

Formelsammlung elektronische Schaltungen

1. Operationsverstärker

a. Grundschaltungen mit OPVs

Spannungs-Strom-Wandler	$I_L = \frac{U_1}{R_1}$
Strom-Spannungs-Wandler	$U_2 = -I_x R_M$
Invertierender Addierer	$-U_2 = U_{11} \frac{R_2}{R_{11}} + U_{12} \frac{R_2}{R_{12}} + U_{13} \frac{R_2}{R_{13}} + \dots$
Invertierender Integrator	$u_2 = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^t u_1(t') dt' + U_{20}(t=0)$
Logarithmierer	$U_D = -U_2 = U_T \cdot \ln\left(\frac{I_D}{I_S}\right) = U_T \cdot \ln\left(\frac{U_1}{R_1 \cdot I_S}\right)$
Subtrahierer	$U_2 = U_{11} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \left(\frac{R_2 + R_1}{R_1}\right) - U_{12} \frac{R_2}{R_1}$
Instrumentenverstärker	$U_2 = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right) \cdot (U_{11} - U_{12})$
Nichtinvertierender Schmitt-Trigger	$U_{Ku} = -\frac{R_1}{R_2} U_{2max} + U_{ref} \frac{R_1 + R_2}{R_2}$ $U_{Ko} = -\frac{R_1}{R_2} U_{2min} + U_{ref} \frac{R_1 + R_2}{R_2}$
Invertierender Schmitt-Trigger	$U_{Ku} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{2min} + U_{ref} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ $U_{Ko} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{2max} + U_{ref} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$

b. Realer OPV in N-INV oder INV Grundschaltung

Betriebs-eigenschaft	N-INV Verstärker	INV Verstärker
$A_U = u_2 / u_1$	$A_U^N = \frac{A_{UD}}{1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot A_{UD}}$	$A_U^I = -\frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{A_{UD}}{1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot A_{UD}}$
$1/A_U = u_1 / u_2$	$\frac{1}{A_U^N} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} + \frac{1}{A_{UD}}$	$\frac{1}{A_U^I} = -\left[\frac{R_1}{R_2} + \frac{1}{A_{UD}} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)\right]$
$r_1 = u_1 / i_1$	$r_1^N = r_{1D} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot A_{UD}\right)$	$r_1^I = R_1 + \frac{R_2}{1 + A_{UD}}$
$r_2 = u_2 / i_2$	$r_2^N = r_2^I = \frac{r_2}{1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot A_{UD}}$	**)

c. GBW, Slew Rate und Leistungsbandbreite

GBW	$A_{U0} \cdot f_G = A_{U0}^N \cdot f_G^N = 1 \cdot f_T = GBW = konst$
Slew Rate	SR, max. Anstieg Ausgangsspannung in V/μs (du/dt)
Kleinsignal	$f_G^N = 1/2\pi\tau$ und $t_r = 0,35/f_G^N$
Leistungsbandbreite	$f_p = SR/2\pi\hat{u}_{2max}$

2. Passive und aktive RC-Schaltungen

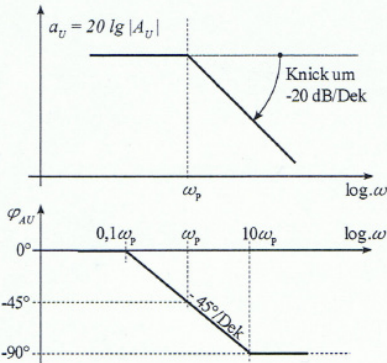


Abbildung 2.10. Beitrag eines Poles auf der negativen reellen Achse zum Betrags- und Phasengang der Übertragungsfunktion

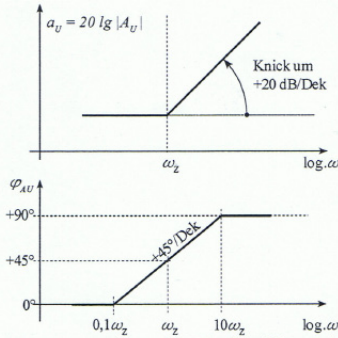


Abbildung 2.11. Beitrag einer Nullstelle auf der negativen reellen Achse zum Betrags- und Phasengang der Übertragungsfunktion

3. Rückkopplung

a. Allgemein

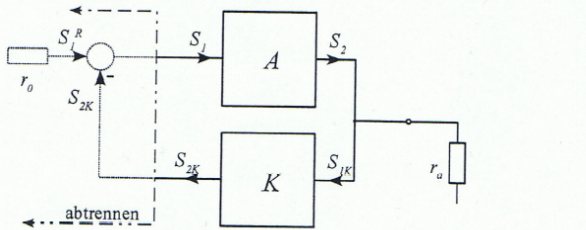
$$A = \frac{S_2}{S_1} = \begin{cases} u_2/u_1 & U\text{-Verstärkung } A_U \\ i_2/i_1 & I\text{-Verstärkung } A_I \\ u_2/i_1 & \text{Transimpedanz } A_Z \\ i_2/u_1 & \text{Transadmittanz } A_Y \end{cases}$$

$$K = \frac{S_{2K}}{S_{1K}} = \begin{cases} u_{2K}/u_{1K} = K_U \\ i_{2K}/i_{1K} = K_I \\ u_{2K}/i_{1K} = K_Z \\ i_{2K}/u_{1K} = K_Y \end{cases}$$

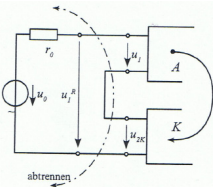
b. Schleifenverstärkung

Verstärkung

$$A^R = \frac{A}{1 + A_S} = \frac{A \cdot S_1}{S_1 + S_{2K}} = \frac{A \cdot S_1}{S_1 + A_S \cdot S_1} \text{ bzw. } A^R = \frac{1}{K} \text{ für } A_S \gg 1$$

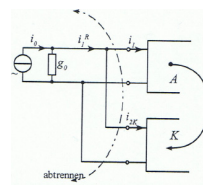


$$A_S = \frac{\text{Signal am Ende der Schl.}}{\text{Signal am Anfang der Schl.}} = \frac{S_{2K}}{S_1} = \begin{cases} \frac{u_{2KLL}}{u_1} & (\text{LL} = \text{Leerlauf}) \\ \frac{i_{2KKS}}{i_1} & (\text{KS} = \text{Kurzschluss}) \end{cases}$$



N-INV

$$A_S = \frac{A_U \cdot R_1}{R_1 + R_2} = A_U \cdot K_U$$



INV

$$A_S = \frac{A_U \cdot r_1}{R_2} = A_Z \cdot K_Y$$

c. Verhalten von Verstärkern mit unzureichendem Phasenrand

Zeitbereich	$q = \frac{u_{2M} - u_{2\infty}}{u_{2\infty}} \cdot 100$ Überschwingen mit $f \approx f_{ST}$
Frequenzbereich	$\ddot{u}_{HM} = a_{UM}^N - a_{U0}^N \approx 20 \cdot \log\left(\frac{1}{2 \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)}\right)$ Resonanz mit $f \approx f_{ST}$

d. Unterschiede im Frequenzgang der Betriebsverstärkung zwischen INV und N-INV Verstärker

für N-INV Verstärker gilt $a_U^N = -k_U$ unterhalb f_{ST} und $a_U^N = a_U$ oberhalb f_{ST}

s. erstes Kapitel, Verstärkungen sind unterschiedlich, aber f_{ST} ist gleich, Frequenzgang von N-INV ableiten.

4. Transistorschaltungen

a. Allgemein

Bipolartransistor	FET
<p>npn-Transistor</p>	<p>n-Kanal-FETs</p>
<p>pnp-Transistor</p>	<p>p-Kanal-FETs</p>

b. Transistor in Grundschaltungen

Bipolartransistor	FET

	Bipolartransistor		FET			
	E-GS	C-GS	S-GS	D-GS		
$A_U = u_2/u_1$	$-g_m \cdot r_a'$	$\frac{r_a'}{r_m + r_a'}$	$-g_m \cdot r_a'$	$\frac{r_a'}{1/g_m + r_a'}$		
$A_I = i_2/i_1$	$\beta \cdot \frac{r_a'}{r_a}$	$-\beta \cdot \frac{r_a'}{r_a} = -A_U \frac{r_{1T}}{r_a}$	----	----		
r_{1T}	$\beta \cdot r_m$	$\beta \cdot (r_m + r_a')$	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow \infty$		
r_{2T}	r_{CE}	$r_m + \frac{r_0}{\beta}$	r_{DS}	$\frac{1}{g_m}$		
Allgemein	$g_m = \frac{1}{r_m} = \frac{ I_C^0 }{U_T}$	$r_{CE} = \frac{U_Y}{ I_C^0 }$	$r_a' = r_a r_{CE}$	$g_m = \frac{2 \cdot \sqrt{I_D^0 \cdot I_{DSS}}}{ U_P }$	$r_{DS} = \frac{U_Y}{ I_D^0 }$	$r_a' = r_a r_{DS}$

c. Zusätzliche Gleichungen FET

Anlaufbereich	$I_D = \beta \left[(U_{GS} - U_{TH}) U_{DS} - \frac{1}{2} U_{DS}^2 \right]$ mit $\beta = K_P \frac{W}{L}$ $\frac{1}{r_{DS}} = \beta U_{GS}^0 - U_{TH} - U_{DS} $
Abschnürbereich	$I_D = \frac{\beta}{2} (U_{GS} - U_{TH})^2$ $g_m = \frac{i_D}{u_{GS}} = \sqrt{2\beta I_D^0 } = \beta U_{GS}^0 - U_{TH} $ $r_{DS} = \frac{1 + \lambda U_{DS}^0}{\lambda I_D^0} \approx \frac{U_Y}{ I_D^0 }$

d. Analyse einstufiger RC-Transistorverstärker

AC-Ersatzschaltbild	R_X und R_Y (vereinfachen); $\omega_m C_K \rightarrow \infty$, $\omega_m C_P \rightarrow 0$, $u_3(t)=0$
Vorwärtsbetriebsgrößen des Transistors	Ermitteln von r_{1T} , A_{UT} und A_{IT} (s. Tabelle unter b.)
Vorwärtsbetriebsgrößen des Verstärkers	Ermitteln von $A_{UV} = A_{UT}$, A_{UO} , $A_{IV} = -A_{UV} \cdot r_{1V}/R_L$ und r_{1V}
Rückwärtsbetrieb	Eingang kurzschließen, Ausgang mit SQ, r_{2T} und r_{2V} ermitteln
Aussteuergrenzen	<i>Bipolar</i> : $\hat{u}_{2max} = \text{Min}[(I_C^0 \cdot r_a), (U_{CE}^0 - U_{CESat})]$ <i>FET</i> : $\hat{u}_{2max} = \text{Min}[(I_D^0 \cdot r_a), (U_{DS}^0 - U_{DSSat})]$

e. Rückkopplung bei Transistorverstärkern

A_U^R	$-\frac{g_m r_a}{1 + g_m R_K} \approx -\frac{r_a}{R_K}$ für $R_K \gg \frac{1}{g_m}$	r_1^R	$\beta \cdot (r_m + R_K)$
A_I^R	β	r_2^R	$r_{2T} \cdot (1 + g_m R_K)$

f. Strom-/Spannungsquellen

Rückkopplung	$r_{SQ} = r_{CE}(1 + g_m R_E)$ bzw. $r_{SQ} = r_{DS}(1 + g_m R_S)$
---------------------	--

g. Differenzverstärker

Differenz-aussteuerung	$A_{Da} = \frac{u_{2a}}{u_{1D}} = -\frac{g_m}{2} r'_{aa}$ mit $r'_{aa} = r_{aa} r_{CE}$ $A_D = -g_m r'_a$ mit $r_a = r_{aa} = r_{ab}$	Kleinsignal
Gleichtakt-aussteuerung	$A_{Ga} = -\frac{g_m r_{aa}}{1 + 2g_m R_E}$ $A_G = 0$ (sym.) = $\frac{-\Delta r_a}{2R_E} (r_{aa} \neq r_{ab})$	
gemischte A.	$u_{1D} = u_{1a} - u_{1b}$ $u_{1G} = (u_{1a} + u_{1b})/2$	
Gleichtakt-unterdrückung	$A_{CMR(a)} = \frac{A_{Da}}{A_{Ga}} = g_m R_E$ $A_{CMR} = \frac{2g_m R_E}{\Delta r_a / r_a}$	
Eingangswiderstand	$r_{1D} = \frac{u_{1D}}{i_{1D}} = 2\beta r_m$ mit $r_m = \frac{U_T}{I_C^0}$	
aktive Lasten	Einsetzen von r_{CE} bzw. r_{SQ} in obige Gleichungen	
Slew Rate	$R_C: SR = \frac{2I_0}{C_2}$ $SQ - Last: SR = \frac{I_0}{C_2}$ <i>single-ended</i> : $SR = \frac{2I_0}{C_2}$	