

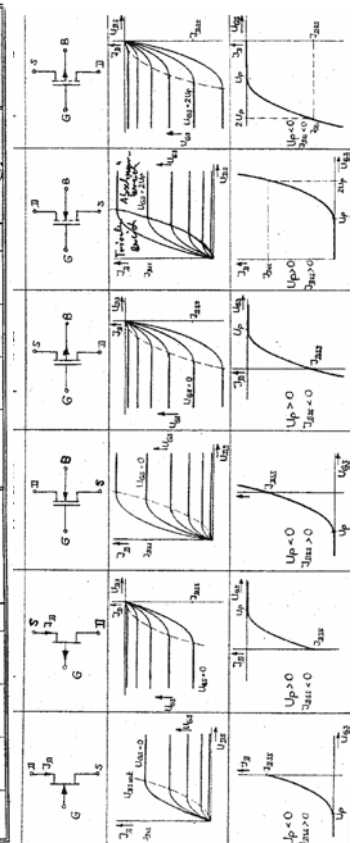
# Formelsammlung Elektronische Schaltungen

Operationsverstärker	Idealer OPV	Eigenschaft	Gesetze: $U_2 = U_{1D} \cdot A_{UD}$   $U_{1D} = U_{1P} - U_{1N}$   $U_{1G} = \frac{U_{1P} + U_{1N}}{2}$ Annahme: $A_{UD} \rightarrow \infty$   $r_2 \rightarrow 0$   $U_{1N} = U_{1P}$   $U_{1D} \rightarrow \infty$   $I_{1P} = I_{1N} = 0$					
		Grundsaltung	N-INV	INV	Addierer	Subtrahierer	Integrator	
	OPV mit Fehlgrößen	DC-Fehlgrößen	Definitionen:	Eingang-Ruhestrom $I_B = \frac{I_{1P} + I_{1N}}{2}$	Eingangs-Offsetstrom $i_{off} = I_{1P} - I_{1N}$   $I_{off} \ll  I_{1P} ,  I_{1N} $		Ruheströme $I_{1P} = I_B + \frac{I_{off}}{2}$   $I_{1N} = I_B - \frac{I_{off}}{2}$	
			Fehlerbeitrag:	Gleichtaktverstärker $A_{UG} = \frac{dU_2}{dU_{1G}}$	Gleichtaktunterdrück. $A_{CMR} = \frac{A_{UD}}{A_{UG}}$	Gleichtaktunterdrückungsmaß $A_{CMR} = 10^{\frac{CMRR}{20}}$	$CMRR = \alpha_{CMR}$	
		AC-Fehlgrößen	Differenz- und Gleichtakteingangswiderstnd: $r_{1D} = \frac{u_{1D}}{i_{1D}}$   $r_{1G} = \frac{u_{1G}}{i_{1G}} \gg r_{1D}$					
			Verstärkungs-bandbreite-Produkt	Kleinsignal-Einschwingverhalten: $t_r \approx 2.2\tau = \frac{0.35}{f_G^N}$ (Anstiegszeit)   $\tau = \frac{1}{2\pi f_G^N}$			Leistungsbandsbreite	
	Mehrstufige Verstärker		Gesamtverstärkung: $A_{U_{Ges}} = A_{U_A} \cdot A_{U_B} \cdot A_{U_C}$ ; $a_{u_{Ges}} = a_{u_A} + a_{u_B} + a_{u_C}$ Def. des Pols der Systemfunkt. $\omega_p =  s_p $					
	Übertragungsfunktionen:		Verstärker ohne RK $G_V = \frac{S_2}{S_1}$ ; RK-Netzwerk: $G_K = \frac{S_{2K}}{S_{1K}}$   $k = \frac{s_{2k}}{2i_k} = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2}$   $u_{1k} = u_2$					
	Übertragungsfunktion eines rückgekoppelten Verstärkers		$G^R = \frac{S_2^R}{S_1^R} = \frac{G_V}{1 + G_V G_K} \approx \frac{1}{G_K}$ mit $G_V G_K = A_S$ (Schleifenverst.)					
	Ermittlung der Schleifenver.		$A_S = \frac{S_{2K}}{S_1} = \frac{u_{2KLL}}{u_1} = \frac{i_{2KK}}{i_1}$   $A_S = k \cdot A_U$					
Rückkopplung	Beeinflussung der Verstärkereigenschaften durch die Rückkopplung		Rückkopplungsart				Bezeichnung der RK	
			U/U-RK	U/I-RK	I/U-RK	I/I-RK	$Ausgang : \frac{S_2}{S_1} - RK$	
			Spannungs-Verstärkung $A_u^R$	$\frac{A_u}{1+A_S}$	$A_U$	$\frac{A_u}{1+A_S}$	$A_U$	Stabilisierte ÜB-Funktion
			Strom-Verstärkung $A_I^R$	$A_I$	$\frac{A_I}{1+A_S}$	$A_I$	$\frac{A_I}{1+A_S}$	
			Eingangs-Widerstand $r_i^R$	$r_i(1+A_S)$	$\frac{r_i}{1+A_S}$	$r_i(1+A_S)$	$\frac{r_i}{1+A_S}$	$A_U^R = \frac{u_2^R}{u_1^R}$
			Ausgangs-Widerstand $r_o^R$	$\frac{r_o}{1+A_S R}$	$\frac{r_o}{1+A_S R}$	$r_2(1+A_S R)$	$r_2(1+A_S R)$	$A_I^R = \frac{i_2^R}{i_1^R}$
			Bandbreite $b^R$	$b(1+A_S)$				$\frac{U}{I}$
			Änderungsfaktor für Rauschen und Klirren	$\frac{1}{1+A_S}$				$\frac{U}{I}$
			Stabilitätsfaktor (Parametereinstreuung)	$\frac{1}{1+A_S}$				$\frac{I}{U}$
			Änderung der Ein- und Ausgangswiderstände unter Einfluß der GK oder MK					
Spezielle Schleifenverstärkung		Nichtinvertierender Verstärker $A_S = A_u \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$			Invertierender Verstärker $A_S = r_1 \cdot A_{U_I} \cdot G_2 = A_{ZV} \cdot A_{YK}$			
Stabilitätskriterien		Nyquist			Bode			
Phasenrand $\rho > 0$ ( $45^\circ$ )		$ A_S(j\omega_{ST})  = 1$ wird als Ortskurve nicht geschnitten			Steigung $< 40\text{dB/Dek}$ ; $\rho = 45^\circ$ für $f_{S1} = f_{S2}$			
Phasenrand ( $\rho$ )		$\rho = \rho(f_{ST}) + 180^\circ$ ; wobei $f_{ST}$ Frequenz, bei der sich $a_u(f)$ und $1/k_U(f)$ schneiden Unterhalb $f_{ST}$ : $a_U^R = \frac{1}{k_u}$   Oberhalb $f_{ST}$ : $a_U^R = a_U$						
Kompensation	Lag (nacheilend)	$C_K$ wird „in“ OPV eingebaut. Dadurch wird 2hdB/Dek-Gerade verschoben, bis 2. Pol auf der $1/k_U$ liegt. Bei Vollkompensation muss Pol auf 0dB-Linie ( $A_U^N=1$ ) liegen						
	Lead (voreilend)	(paralleles) RC-Glied wird in Rückkopplungszweig eingebaut, so dass $1/k_U$ -Linie nach unten abgknickt. Dadurch entsteht Phasenbuckel, der $\rho$ anhebt						
Transistorschaltungen	Bipolar-Transistoren		$I_C^0 = -I_E^0 = \frac{U_B - U_{BE}^0}{R_E} \approx \frac{U_B - 0.6V}{R_E}$					
	FET-Transistoren		$I_{DSS} = \frac{1}{2} K U_{TH}^2 \frac{W}{L}$	$g_m = \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} = \frac{i_C}{u_{GS}} = -\frac{2I_{DSS}}{U_P} \left(1 - \frac{U_{GS}^0}{U_P}\right) = \frac{2\sqrt{I_{DSS} I_D}}{ U_P }$				
	Abshnürb.	$U_{DS} \geq U_{DS_{sat}} = U_{GS} - U_P$		$U_{GS} = U_P \left(1 \pm \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}}\right)$   $I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P}\right)^2$				
	Anlaufb.	$U_{DS} < U_{DS_{sat}} = U_{GS} - U_P$		$I_D = \frac{I_{DSS}}{U_P^2} [2(U_{GS} - U_P)U_{DS} - U_{DS}^2]$				

Kleisignalverstärker	DC-Arbeitswiderstand	Kondensatoren sperren; Widerstand $R_a$ ist Kollektor und Emmitterwiderstand			
	AC-Arbeitswiderstand	Kondensatoren leiten ( $U_S$ kurzschl.); Widerstand $r_a$ Parallelschaltung Last+Kollektor			
	Aussteuergrenzen	$\hat{u}_{2max} = \text{MIN}[(I_C^0 r_a) \text{ oder } (U_{CE}^0 - U_{CE,sat})]$	$\hat{u}_{2max} = \text{MIN}[(I_D^0 r_a) \text{ oder } (U_{DS}^0 - U_{DS,sat})]$		
Stromspiegel		$I_{SQ} =  I_C^0  = \frac{U_B -  U_{BE}^0 }{R_E}$	$r_{SQ} = r_{CE}(1 + g_m R_E)$		
Differenzverstärker	Grundschtaltung	$U_{BEa} = U_{BEb} = -\varphi_E^0 \approx 0.6...0.7V$	$I_{Ca} = I_{Cb} = I_C^0 = \frac{I_{RE}}{2}$	$I_{RE} = \frac{\varphi_E + U_{S2}}{R_E}$	$\varphi_C^0 = U_{2a}^0 = U_{2b}^0 = U_{S1} - R_C I_C^0$
	Reine Differenz	$A_{DA} = \frac{u_{2a}}{u_{1D}} = \frac{u_{2a}}{2u_{11}} = -\frac{g_m r_a'}{2}$	$A_{Db} = -A_{Da}$	$A_D = \frac{u_2}{u_{1D}} = \frac{u_{2a} - u_{2b}}{u_{1a} - u_{1b}} = \frac{2u_{2a}}{2u_{11}} = -g_m r_a'$	
	Reine Gleichtakt	$A_{Ga} = \frac{u_{2a}}{u_{1G}} = \frac{u_{2a}}{u_{11}} = \frac{-g_m r_a' \alpha}{1 + 2g_m R_E} \approx \frac{-r_a'}{2R_E}$	$2g_m R_E \gg 1$	$A_G = 0$	
	gemischt	symmetrisch		unsymmetrisch	
		$u_{2a} = A_{Da} u_{1D} + A_{Ga} u_{1G}$		$u_2 = A_D u_{1D} + A_G u_{1G}$	
		$A_{CMR(a)} = \frac{A_{Da}}{A_{Ga}} = g_m R_E$	(Gleichtaktunterdrückung)		$A_{CMR} = \frac{A_D}{A_G} = \frac{2g_m R_E}{\frac{\Delta r_a}{r_a}}$

<p>idealer Integrator I-Element <math>U = 1 \text{ bei } f \rightarrow 0</math></p>	<p>idealer Differenzierer D-Element <math>A(f) = 1 \text{ bei } f \rightarrow \infty</math></p>	<p>Tiefpass 1. Ordnung (z.B. RC-TP) PT1-Element <math>A(f) = 1 \text{ bei } f \rightarrow 0</math></p>	<p>Hochpass 1. Ordnung (z.B. RC-HP) DT1-Element <math>A(f) = 0 \text{ bei } f \rightarrow 0</math></p>	<p>mittle Nullstelle (<math>\lambda_p &lt; 0</math>) PD-Element</p>	<p>mittle Nullstelle (<math>\lambda_p &lt; 0</math>) PI-Element</p>
<p>20 dB/Dek</p>	<p>+20 dB/Dek</p>	<p>-20 dB/Dek</p>	<p>+20 dB/Dek</p>	<p>0 dB/Dek</p>	<p>0 dB/Dek</p>
<p>0</p>	<p>0</p>	<p>0</p>	<p>0</p>	<p>0</p>	<p>0</p>
<p><math>A(f) = \frac{\omega_0}{j\omega} = \frac{1}{j}</math></p>	<p><math>A(f) = \frac{\omega}{j\omega_0} = j</math></p>	<p><math>A(f) = \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}}</math></p>	<p><math>A(f) = \frac{j\frac{\omega}{\omega_0}}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}}</math></p>	<p><math>A(f) = 1 + \frac{1}{j\omega T_D}</math></p>	<p><math>A(f) = 1 + \frac{1}{j\omega T_I}</math></p>
<p><math>A(f) = \frac{1}{j}</math></p>	<p><math>A(f) = j</math></p>	<p><math>A(f) = \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}}</math></p>	<p><math>A(f) = \frac{j\frac{\omega}{\omega_0}}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}}</math></p>	<p><math>A(f) = 1 + \frac{1}{j\omega T_D}</math></p>	<p><math>A(f) = 1 + \frac{1}{j\omega T_I}</math></p>

<p>Annahmen: <math>I_C^0 \leq 2 \text{ mA}</math>; <math>\beta_p &gt; 1</math>.</p>		
<p>E-GS</p>	<p>B-GS</p>	<p>C-GS</p>
<p><math>A_u = \frac{u_2}{u_1} = -g_m r_a'</math></p>	<p><math>A_u = \frac{u_2}{u_1} = g_m r_a'</math></p>	<p><math>\frac{r_a'}{r_a + r_a'} = 1</math></p>
<p><math>A_i = \frac{i_2}{i_1} = \beta \frac{r_a'}{r_a}</math></p>	<p><math>A_i = \frac{i_2}{i_1} = -\beta</math></p>	<p><math>-(1 + \beta) \frac{r_a'}{r_a}</math></p>
<p><math>r_{iT} = \frac{u_1}{i_1} = \beta r_m</math> (<math>r_a &lt; r_{CE}</math>)</p>	<p><math>r_{iT} = \frac{u_1}{i_1} = r_m</math> (<math>r_a &lt; r_{CE}</math>)</p>	<p><math>\beta (r_m + r_a')</math></p>
<p><math>r_{iZ} = \frac{u_2}{i_2} = r_{CE}</math> (<math>r_a &lt; \beta r_m</math>)</p>	<p><math>r_{iZ} = \frac{u_2}{i_2} = \frac{r_a' r_{CE}}{r_m}</math> (<math>r_m &lt; r_a &lt; \beta r_m</math>)</p>	<p><math>r_m + r_a / \beta</math></p>
<p><math>r_{iZ} = \frac{u_2}{i_2} = r_{CE}/2</math> (<math>r_a &gt; \beta r_m</math>)</p>	<p><math>r_{iZ} = \frac{u_2}{i_2} = \beta \frac{r_{CE}}{2}</math> (<math>r_a &gt; \beta r_m</math>)</p>	<p><math>r_{CE}/2</math> für <math>r_a \rightarrow \infty</math></p>
<p>S-GS</p>	<p>G-GS</p>	<p>D-GS</p>
<p><math>A_u = \frac{u_2}{u_1} = -g_m r_a'</math></p>	<p><math>A_u = \frac{u_2}{u_1} = g_m r_a'</math></p>	<p><math>\frac{r_a'}{r_a' + 1/g_m}</math></p>
<p><math>A_i = \frac{i_2}{i_1} = -\infty</math></p>	<p><math>A_i = \frac{i_2}{i_1} = -1</math></p>	<p><math>-\infty</math></p>
<p><math>r_{iT} = \frac{u_1}{i_1} = \infty</math></p>	<p><math>r_{iT} = \frac{u_1}{i_1} = \frac{1}{g_m}</math></p>	<p><math>\infty</math></p>
<p><math>r_{iZ} = \frac{u_2}{i_2} = r_{DS}</math></p>	<p><math>r_{iZ} = \frac{u_2}{i_2} = r_{DS} (1 + g_m r_a')</math></p>	<p><math>\frac{1}{g_m}</math></p>



**Auswirkung der Fehlgrößen in realen Schaltungen**

- Ausgangsspannung bei idealem OPV
- Beiträge  $U_{Onf}$ ,  $I_P$ ,  $I_{IN}$  (alle anderen Quellen Null setzen)
- Beitrag von  $U_{IG}$  und  $A_{CMR}$  (Gleichtakt Eingangsspannung muss anliegen ( $U_{IP}$ ))

**Analyse einstufiger Transistorverstärker**

- DC-Schalbild (C sperren)  $\rightarrow$  AP
- AC-Schalbild (C lässt durch)
- Vorwärtsbetriebsgrößen am  $r_{iT}$   
 $\text{Tran.}(r_{iT}; A_{uT}; A_{iT} = -A_{uT} \frac{r_{iT}}{r_a})$
- Vorwärtsbetriebsgrößen am Ver.  
 $A_{uV} = A_{uT} A_{uV} = -A_{uV} \frac{r_{1b}}{R_L}$   
 $A_{uQ} = A_{uV} \frac{r_{1V}}{R_Q + r_{1V}}$