

Formelsammlung Elektronische Bauelemente

Martin Dietschreit, Willy Hille, Julia Nützel,
Colin Pohle, Eric Richter, Kevin Wenke
nach Original von Marcel Ott.

21. März 2021

Inhaltsverzeichnis

1	E-Reihen	1
2	Grundlagen ET	2
3	dB & dB-Rechnung	2
4	Halbleiter allgemein	3
5	Einweggleichrichter	4
6	Zweipuls-Mittelpunkt-Schaltung (M2U)	4
7	Brückengleichrichter = „Grätzbrücke“	5
8	RC-Sieb	5
9	LC-Sieb	6
10	Zener-Diode	6
11	Spannungsbegrenzung	7
12	Diode als Schalter	8
13	Kapazitätsdioden	8
14	Bipolartransistoren	8
14.1	Bestimmung R_C	9
14.2	Erzeugen der Basisvorspannung	9
14.3	Thermische Arbeitspunktstabilisierung	10
15	Transistor-Grundsaltungen	10
15.1	Emitter-Schaltung	10
15.2	Kollektor-Schaltung	11
15.3	Basis-Schaltung	11
15.4	Selektivverstärker	12
15.5	Schaltverstärker	12
15.5.1	Schaltverstärker mit Hilfsspannungen	12
15.6	Feldeffekt-Transistoren	12
15.6.1	Source-Schaltung	13
15.6.2	Drain-Schaltung	13

16	OPV - Operationsverstärker	14
16.1	Anwendungen mit frequenzunabhängiger Gegenkopplung	14
16.1.1	Invertierender Verstärker/Umkehrverstärker	14
16.1.2	Nichtinvertierender Verstärker/Elektrometerverstärker	14
16.1.3	Spannungsfolger	15
16.1.4	Addierverstärker	15
16.1.5	Subtrahierverstärker	15
16.2	OPV mit frequenzunabhängiger Gegenkopplung	16
16.2.1	Integrierverstärker	16
16.2.2	Differenzierer	16
16.2.3	Komparator/Vergleicher	16
16.3	Schmitt-Trigger	17
16.3.1	invertierter SWS	17
16.3.2	nichtinvertierter SWS	17
16.3.3	nichtinvertierter SWS mit Referenzspannungsquelle	17
16.3.4	invertierter SWS mit Referenzspannungsquelle	17

1 E-Reihen

E6	E12	E24	E48	E96
20%	10%	5%	2%	1%
1	1	1	1	1
				1,02
			1,05	1,05
				1,07
		1,1	1,1	1,1
				1,13
			1,15	1,15
				1,18
	1,2	1,2	1,21	1,21
				1,24
			1,27	1,27
				1,3
		1,3	1,33	1,33
				1,37
			1,4	1,4
				1,43
1,5	1,5	1,5	1,47	1,47
				1,5
			1,54	1,54
				1,58
		1,6	1,62	1,62
				1,65
			1,69	1,69
				1,74
	1,8	1,8	1,78	1,78
				1,82
			1,87	1,87
				1,91
		2	1,96	1,96
				2
			2,05	2,05
				2,1
2,2	2,2	2,2	2,15	2,15
				2,21
			2,26	2,26
				2,32
		2,4	2,37	2,37
				2,43
			2,49	2,49
				2,55
	2,7	2,7	2,61	2,61
				2,67
			2,74	2,74
				2,8
		3	2,87	2,87
				2,94
			3,01	3,01
				3,09
20%	10%	5%	2%	1%
E6	E12	E24	E48	E96

E6	E12	E24	E48	E96
20%	10%	5%	2%	1%
3,3	3,3	3,3	3,16	3,16
				3,24
			3,32	3,32
				3,4
		3,6	3,48	3,48
				3,57
			3,65	3,65
				3,74
	3,9	3,9	3,83	3,83
				3,92
			4,02	4,02
				4,12
		4,3	4,22	4,22
				4,32
			4,42	4,42
				4,53
4,7	4,7	4,7	4,64	4,64
				4,75
			4,87	4,87
				4,99
		5,1	5,11	5,11
				5,23
			5,36	5,36
				5,49
	5,6	5,6	5,62	5,62
				5,76
			5,9	5,9
				6,04
		6,2	6,19	6,19
				6,34
6,8	6,8	6,8	6,49	6,49
				6,65
			6,81	6,81
				6,98
		7,5	7,15	7,15
				7,32
			7,5	7,5
				7,68
	8,2	8,2	7,87	7,87
				8,06
			8,25	8,25
				8,45
		9,1	8,66	8,66
				8,87
			9,09	9,09
				9,31
			9,53	9,53
				9,76
20%	10%	5%	2%	1%
E6	E12	E24	E48	E96

Verwendung: Wert aus der gewünschten Reihe auswählen (Standard: **E24**) und mit 10^n für beliebiges ganzzahliges n multiplizieren. Der letzte Eintrag in **E24** kann also $9,1\Omega$, 910Ω , aber auch $0,00091\Omega$ beschreiben. (Letzterer hat evtl. keinen praktischen Nutzen.)

$$C_{\text{gew}} \geq C_{\text{berechnet}} \quad R_{\text{min}} \leq R_{\text{gew}} \pm R_{\text{gew}} \cdot \text{Toleranz} \leq R_{\text{max}}$$

2 Grundlagen ET

Elektrischer Parameter	Einheit	Symbol	Definition
Spannung	Volt	$[U] = 1V$	$1V = 1 \frac{J}{C} = 1 \frac{Nm}{As} = 1 \frac{kg \cdot m^2}{A \cdot s^3} = 1A \cdot \Omega$
Strom	Ampere	$[I] = 1A$	$1A = 1 \frac{C}{s} = 1 \frac{V}{\Omega}$
Widerstand	Ohm	$[R] = 1\Omega$	$R = \frac{U}{I} = \frac{1}{G}$
Leitfähigkeit	Siemens	$[G] = 1S$	$G = \frac{1}{R}$
Kapazität	Farad	$[C] = 1F$	$C = \frac{Q}{U} \quad 1F = 1 \frac{As}{V}$
Ladung	Coulomb	$[Q] = 1C$	$1C = 1As$
Induktivität	Henry	$[L] = 1H$	$1H = 1 \frac{Vs}{A}$
Leistung	Watt	$[P] = 1W$	$P = U \cdot I = \frac{U^2}{R} = I^2 \cdot R$
Frequenz	Hertz	$[f] = 1Hz$	$f = \frac{1}{T}$

Hinweis: U_{a-} bzw. U_{a+} ist nur kürzere Schreibweise für $U_{a_{\min}}$ bzw. $U_{a_{\max}}$

3 dB & dB-Rechnung

$$V_P = \frac{P_{aus}}{P_{ein}} \quad V_U = \frac{U_{aus}}{U_{ein}} \quad V_{P_{dB}} = 10 \lg \frac{P_{aus}}{P_{ein}} \quad V_{U_{dB}} = 20 \lg \frac{U_{aus}}{U_{ein}}$$

negativer dB-Wert: Dämpfung (z.B. $10dB \rightarrow x10$; $-10dB \rightarrow x\frac{1}{10}$)

Stromverstärkung (ungewöhnlich) verhält sich wie Spannungsverstärkung

dB	V_P	V_U
0	1	1
1	$\sqrt[10]{10} = 1,26$	$\sqrt[20]{10} = 1,12$
2	$\sqrt[5]{10} = 1,58$	$\sqrt[10]{10} = 1,26$
3	2	$\sqrt{2} = 1,41$
6	4	2
10	10	$\sqrt{10} = 3,16$
20	100	10
40	10^4	100
60	10^6	1000
80	10^8	10^4
100	10^{10}	10^5

bezogene dB-Werte:

Größe	Bezugswert	Einheit
Leistung P_0	$1mW$	dBm
Leistung P_0	$1W$	dBW
Spannung U_0	$1V$	dBV
Spannung U_0	$1V$	dBV
Spannung U_0	$774,6mV$	dBu
Strom I_0	$1A$	dba
Strom I_0	$1,291mA$	dbi

$$dBm: V_{P_{dB}} = 10 \lg \frac{P_{aus}}{1mW}$$

$$db\mu: V_{U_{dB}} = 20 \lg \frac{U_{aus}}{1\mu V}$$

→ Zerlegen

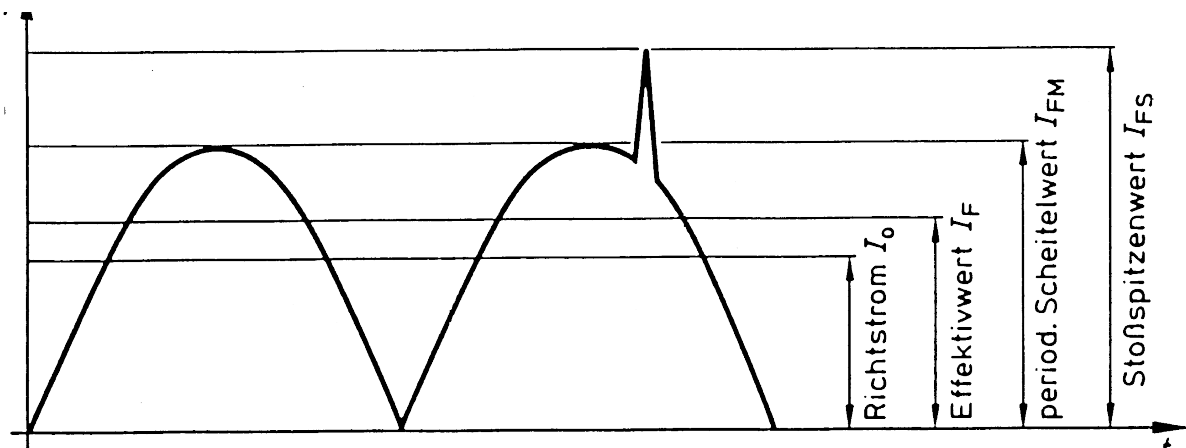
$$V_{ges} = \prod_{i=1}^n V_i = V_1 \cdot V_2 \cdot V_3 \cdot \dots \cdot V_n$$

$$V_{ges_{dB}} = \sum_{i=1}^n V_i = V_{1_{dB}} + V_{2_{dB}} + V_{3_{dB}} + \dots + V_{n_{dB}}$$

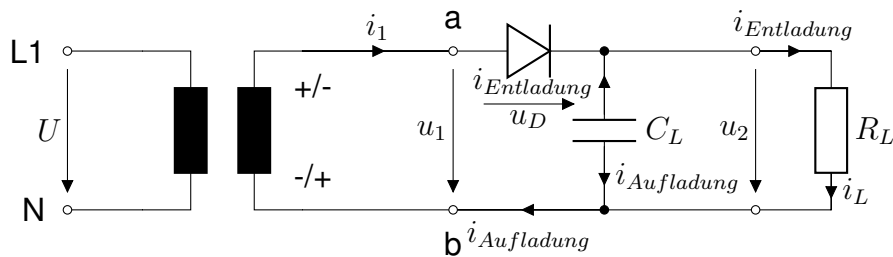
4 Halbleiter allgemein

Besetzungswahrscheinlichkeit:	
$P(W) = \frac{1}{1 + e^{-\frac{W - W_F}{k \cdot T}}}$	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{Ws}{K}$ $T = \text{absolute Temperatur}$ $W_F = \text{Fermi-Niveau}$
$T = 0$ $W > W_F \rightarrow 0$ $W < W_F \rightarrow 1$	$T > 0$ $P(W_F) = \frac{1}{2}$

Legende:	
$I_F = \text{Effektivwert}$	$I_{FM} = \text{periodischer Spitzenstrom}$
$I_{FS} = \text{Stoßspitzenstrom}$	$I_0 = \text{Richtstrom (arithm. Mittel)}$
$t_i = \text{Einschaltdauer}$	$T = \text{Gesamtdauer}$
	$g = \frac{t_i}{T}$
$U_{RRM} = \text{period. Spitzensperrspannung}$	$U_{RSM} = \text{eindeut. Spitzensperrspannung}$
$P_{tot} = \text{tot. Verlustleistung}$	$P_V = U_F \cdot I_F + U_R \cdot I_R$
	$P_V \leq P_{tot}$
$R_{thJU} = \text{therm. Widerstand zw. Sperrschicht \& Umgebung}$	
$R_{thJU} = \frac{\vartheta_J - \vartheta_U}{P_V}$ $\frac{\vartheta_J}{\vartheta_U} \frac{\text{Temperatur Sperrschicht}}{\text{Temperatur Umgebung}}$	$R_{thJU} = R_{thJG} + R_{thGK} + R_{thK}$ $[R_{th}] = \frac{K}{W}$
	$P_{Vmax} = \frac{\vartheta_{I_{max}} - \vartheta_U}{R_{thJG} + R_{thGK} + R_{thK}}$
$R_F = \text{Gleichstromwiderstand Diode}$	$R_R = \text{stat. Sperrwiderstand}$
$r_F = \text{dyn. Durchlasswiderstand}$	$C_D = \text{Diodenkapazität}$
$R = \frac{U}{I}$	$r_f = \frac{\Delta U_F}{\Delta I_F}$
$t_{rr} = \text{Sperrverzögerungszeit}$	

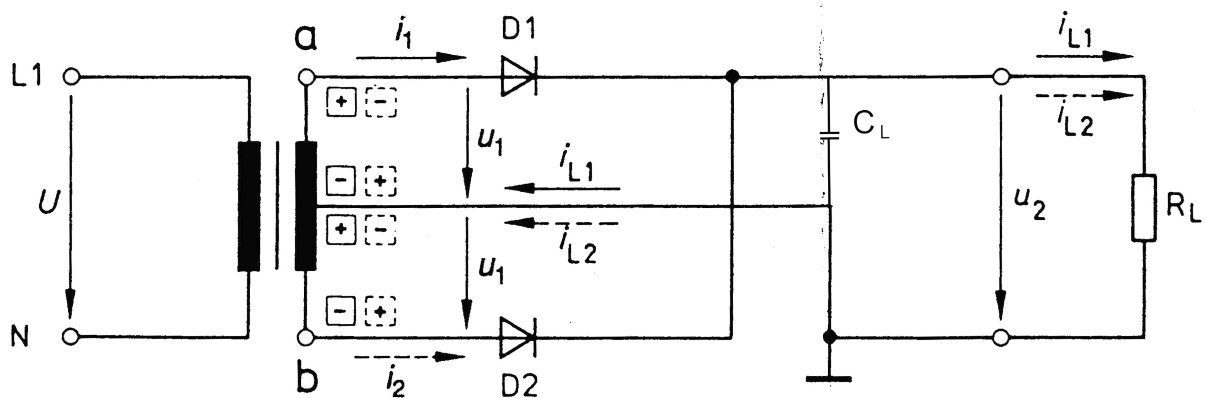


5 Einweggleichrichter



Wert	Formel	Bemerkung
C_L	$= 10 \mu F \cdot [I_L]$	
U_2	$= \sqrt{2} \cdot U_1 - U_{Diode}$	$U_{Diode} \approx 0,6V$ im Leerlauf
U_2	$= 1,2 \cdot U_1$	Belastungsfall
I_{FM}	$\geq 1,2 \dots 5 \cdot I_L$	
U_{RM}	$= 2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_1$	Ungünstigster Fall: Leerlauf
U_{RM}	$= 3 \cdot \sqrt{2} \cdot U_1$	praktisch sinnvolle Auswahl
I_{L-}	$= \frac{U_{2-}}{R_{L \min}}$	Laststrom
\ddot{U}	$= \frac{U_{Primär}}{U_{Sekundär}}$	Trafoübersetzung
U_e	$= 2 \dots 4 \cdot U_a$	praktisch $2 \cdot U_a$
$U_{Br eff}$	$= 4,8 \cdot 10^{-3} \cdot s \cdot \frac{I_{L-}}{C_L}$	
$U_{Br SS-}$	$= 14 \cdot 10^{-3} \cdot s \cdot \frac{I_{L-}}{C_L}$	
W	$= \frac{U_{Br eff}}{U_{L-}}$	Welligkeit

6 Zweipuls-Mittelpunkt-Schaltung (M2U)



Wert	Formel	Bemerkung
U_{2-}	$= \sqrt{2} \cdot U_1 - U_F$	$\approx 1,3 \cdot U_1$
I_{FM}	$\geq 0,72 \cdot I_{L-}$	
U_{RM}	$\geq 3 \cdot \sqrt{2} \cdot U_1$	
$U_{Br eff}$	$= 1,8 \cdot 10^{-3} \cdot s \cdot \frac{I_{L-}}{C_L}$	
$U_{Br SS}$	$= 7 \cdot 10^{-3} \cdot s \cdot \frac{I_{L-}}{C_L}$	

7 Brückengleichrichter = „Grätzbrücke“

Wert Formel

$$U_{2-leer} = \sqrt{2} \cdot U_1 - 2 \cdot U_F$$

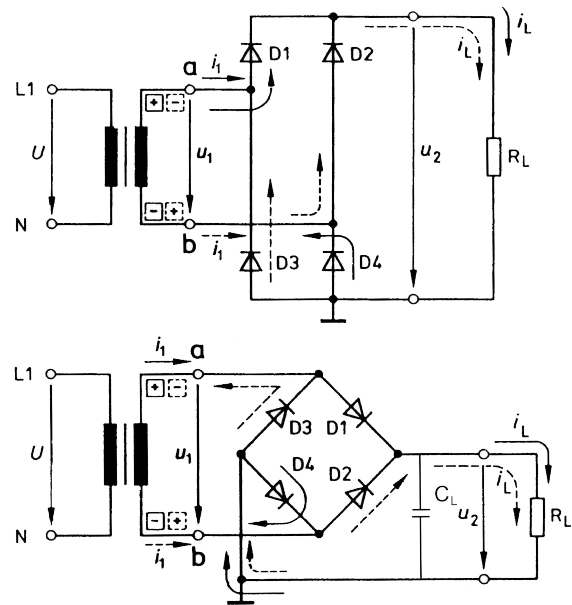
$$U_{2-} = 1,3 \cdot U_1$$

$$I_{FM} \geq 0,72 \cdot I_{L-} \text{ (an den Dioden)}$$

$$U_{RM} \geq 1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot U_1 \text{ (an den Dioden)}$$

$$U_{Br eff} = 1,8 \cdot 10^{-3} \cdot s \cdot \frac{I_{L-}}{C_L}$$

$$U_{Br SS} = 7 \cdot 10^{-3} \cdot s \cdot \frac{I_{L-}}{C_L}$$



8 RC-Sieb

Wert Formel

$$\frac{U_{Br1}}{\sqrt{R_{2S}^2 + x_{Cs}^2}} = \frac{U_{Br2}}{x_{Cs}}$$

$$\frac{U_{Br1}}{U_{Br2}} = G$$

$$G = \sqrt{\left(\frac{R_s}{x_{Cs}}\right)^2 + 1}$$

$$G = 2\pi \cdot f_{Br} \cdot C_s \cdot R_s$$

$$x_{Cs} = \frac{1}{2\pi \cdot f_{Br} \cdot C_s}$$

$$U_{A-} = U_{2-} - U_{Rs}$$

$$U_{Rs} \leq 0,1 \cdot U_2$$

$$U_{Rs} = R_s \cdot I_{L-}$$

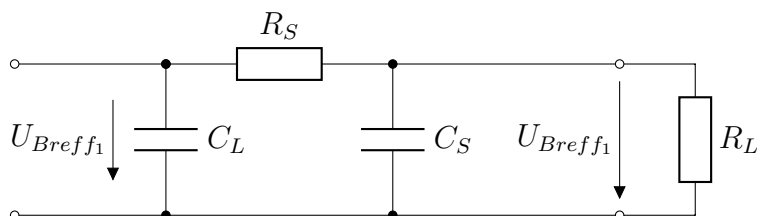
Bemerkung

Voraussetzung: $R_s \gg x_{Cs} \rightarrow G \approx \frac{R_s}{x_{Cs}}$

Glättungsfaktor

sinnvoll: 10 ... 20

sinnvoll: 10 ... 20



9 LC-Sieb

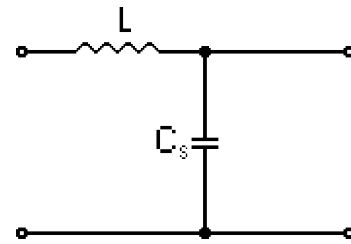
Wert Formel

$$G = \frac{x_L}{x_C} - 1$$

$$x_L = 2\pi \cdot f_{Br} \cdot L_S$$

$$x_C = \frac{1}{2\pi \cdot f_{Br} \cdot C_S}$$

$$G = (2\pi \cdot f_{Br})^2 \cdot L_S \cdot C_S$$



10 Zener-Diode

Diodenbelastung: $P_{vZD} = I_{Z\text{Betrieb max}} \cdot U_Z$

Fall 1: $U_E = \text{konst.}, I_L \text{ ist variabel}$

ohne Last $I_L = 0$ $R_V = \frac{U_E - U_Z}{I_Z}$

mit Last $R_V = \frac{U_E - U_Z}{I_Z + I_L}$ $P_{tot} = I_{Z\text{ max}} \cdot U_Z$

Fall 2: U_E variabel, $I_L = \text{konst.}$

$$U_E = U_{R_V} + U_Z = (I_Z + I_L) \cdot R_V + U_Z$$

$$R_V = \frac{U_E - U_Z}{I_Z + I_L}$$

Fall 3: U_E und I_L variabel $S = \text{relativer Stabilisierungsfaktor}$

$$I_{Z\text{ min}} = 0,1 \cdot I_{Z\text{ max}}$$

$$R_{V\text{ max}} = \frac{U_{E\text{ min}} - U_Z}{I_{Z\text{ min}} + I_{L\text{ max}}}$$

$$S = \left(1 + \frac{R_V}{r_z}\right) \cdot \frac{U_Z}{U_E}$$

$$P_{R_V} = \frac{(U_{E\text{ max}} - U_Z)^2}{R_V}$$

$$R_{V\text{ min}} = \frac{U_{E\text{ max}} - U_Z}{I_{Z\text{ max}} + I_{L\text{ min}}}$$

$$S_{\text{min}} = \left(1 + \frac{R_{V\text{ gew. min}}}{r_z}\right) \cdot \frac{U_Z}{U_{E\text{ max}}}$$

$$U_E = 2 \cdot U_Z$$

$$R_{V\text{ gew min}} = \frac{U_{E\text{ max}} - U_Z}{I_{Z\text{ Betr max}} + I_{L\text{ min}}}$$

$$I_{Z\text{ Betrieb max}} = \frac{U_{E\text{ max}} - U_Z}{R_{V\text{ gew min}}} - I_{L\text{ min}}$$

$$R_{V\text{ min}} \leq R_{V\text{ gew}} \leq R_{V\text{ max}}$$

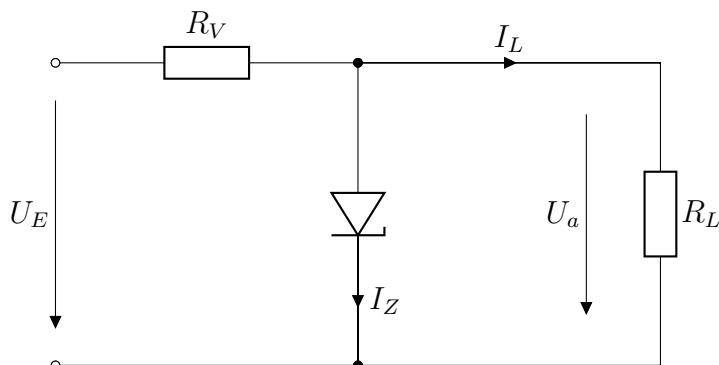
meist gegen $R_{V\text{ max}}$

$$I_{L\text{ max}} = \frac{U_Z}{R_{L\text{ min}}}$$

$$I_L = \frac{U_A}{R_L} = \frac{U_Z}{R_L}$$

$$I_{L\text{ min}} = \frac{U_Z}{R_{L\text{ max}}}$$

Leistung über Diode auch mit berechnen, wenn das nicht explizit gefragt ist.

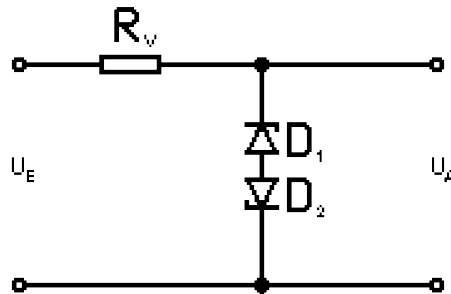


11 Spannungsbegrenzung

a) Spannungsgrenzen mit Z-Dioden

$$\text{pos. HW } U_a = U_S + U_{Z2}$$

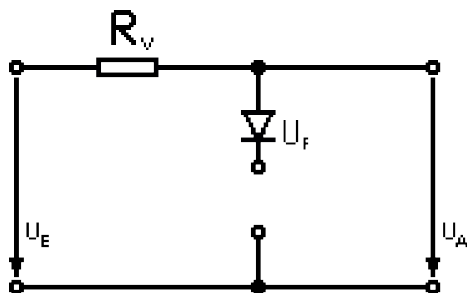
$$\text{neg. HW } U_a = U_S + U_{Z1}$$



b) Spannungsgrenzen mit Gegenspannung

$$U_a = U_S + U_V$$

$$U_e > U_S + U_V$$

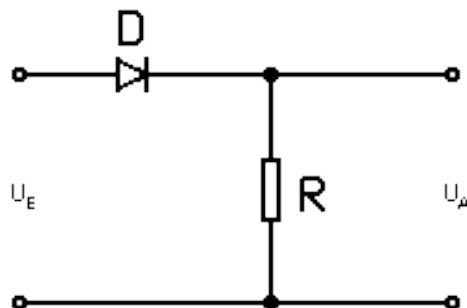


c) Spannungsgrenzen mit Klipperschaltung

$$U_a = U_r$$

$$U_e = U_{S1} + U_{SL} + U_R$$

$$U_e < 2 \cdot U_s$$

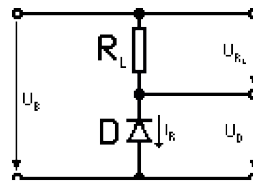
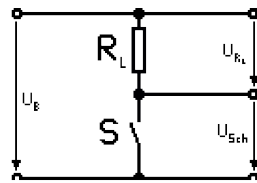


12 Diode als Schalter

offener Schalter:

$$U_B = U_{\text{Schalter}}$$

$$U_{RL} = 0$$



$$U_{RL} = I_R \cdot R_L$$

$$U_{\text{Diode}} = U_R \approx U_B$$

Gefahr: $U_B > U_R$

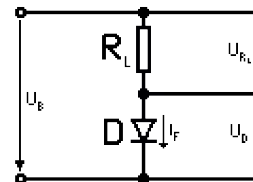
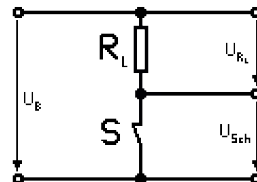
geschlossener

Schalter:

$$U_B = U_{RL}$$

$$U_{\text{Schalter}} = 0$$

I_{RL} zu beachten



$$U_{RL} = U_B - U_S$$

$$U_{\text{Diode}} = U_S$$

Gefahr: $I_{RL} > I_F$

Überlastung Diode

$$P_{S \max} = \text{Schaltleistung der Diode} = U_{RL} \cdot I_{F \max}$$

$$U_{RL} = U_B - U_S \quad I_{F \max} = \frac{P_{\text{tot}}}{U_S} \rightarrow P_{S \max} = P_{\text{tot}} \left(\frac{U_B}{U_S} - 1 \right) \quad R_{L \min} = \frac{(U_B - U_S)^2}{P_{S \max}}$$

13 Kapazitätsdioden

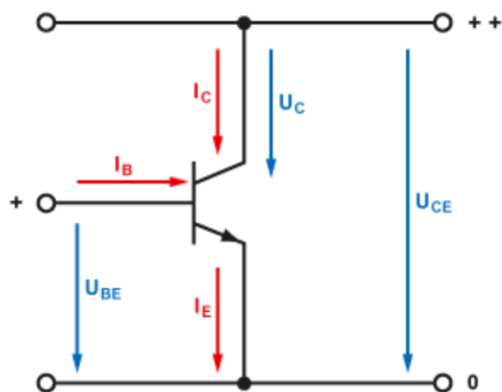


$$\text{Verlustfaktor } \tan \delta = \frac{r_s}{X_C} = 2\pi f \cdot C_D \cdot r_s \quad \text{Güte}$$

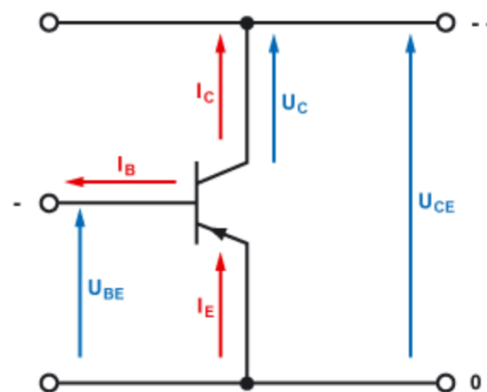
$$Q = \frac{1}{\tan \delta} = \frac{X_C}{r_s} = \frac{1}{2\pi f \cdot C_D \cdot r_s}$$

$$X_e = (2\pi f \cdot C_D)^{-1}$$

14 Bipolartransistoren



Strom und Spannung am NPN-Transistor



Strom und Spannung am PNP-Transistor

$$I_B \uparrow \rightarrow I_C \uparrow \quad I_B = 0 \rightarrow I_C = 0$$

Wert	Formel	Bemerkung
Gleichstromverstärkung B	$= \frac{I_C}{I_B}$	bei $U_{CE} = konst.$
dyn. Gleichstromverstärkung β	$= h_{21e} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$	
P_V	$= U_{CE} \cdot I_C + \underbrace{U_{BE} \cdot I_B}_{\text{vernachl. klein}}$	
Eingangswiderstand Transistor r_{BE}	$= h_{11e} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_{BE}}$	
Ausgangsleitwert Transistor $\frac{1}{r_{CE}}$	$= h_{22e} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}} = \frac{1}{r_{CE}}$	
Steilheit des Transistors S	$= y_{21} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_{BE}}$	
C_1	$= \frac{1}{2\pi f_{gu} \cdot (r_e + R_i)}$	
C_2	$= \frac{1}{2\pi f_{gu} \cdot (r_a + R_L)}$	
r_e	$= R_1 \parallel R_2 \parallel r_{BE}$	

14.1 Bestimmung R_C

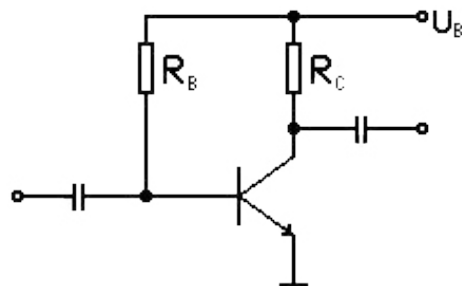
$$U_{CE} \approx \frac{1}{2}U_B \quad R_C = \frac{U_B - U_{CE(a)}}{I_{C(a)}}$$

14.2 Erzeugen der Basisvorspannung

durch Basisvorwiderstand

$$R_B = \frac{U_B - U_{BE(a)}}{I_{B(a)}}$$

$$R_C = \frac{U_B - U_{CE}}{I_C}$$



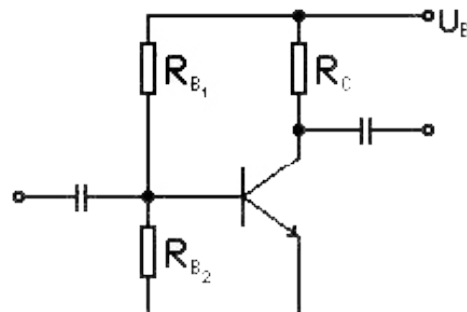
durch Basisspannungsteiler

$$I_q = 2 \dots 10 \cdot I_B$$

$$R_1 = \frac{U_B - U_{BE(a)}}{I_q + I_B}$$

$$R_2 = \frac{U_{BE(a)}}{I_q}$$

$$R_C = \frac{U_B - U_{CE}}{I_C}$$



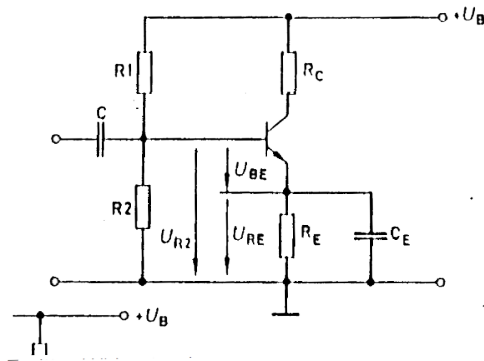
14.3 Thermische Arbeitspunktstabilisierung

durch Emitter-Widerstand:

$$I_E = I_C + I_B \quad U_{RE} = R_E \cdot I_E$$

$$R_C = \frac{U_B - U_{CE} - U_{RE}}{I_C}$$

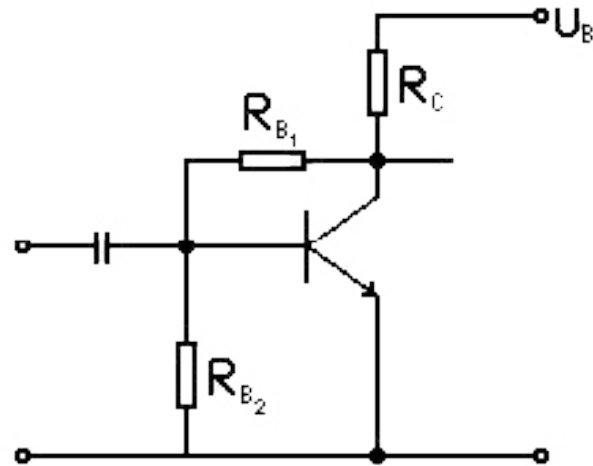
$$C_E \geq \frac{h_{21e}}{2\pi f_{gu} \cdot (h_{11e} + R_i)} = \frac{\beta}{2\pi f_{gu} \cdot (r_{BE} + R_i)}$$



durch Spannungsgegenkopplung:

$$R_1 = \frac{U_{CE} - U_{BE(a)}}{I_q + I_B} \quad R_2 = \frac{U_{BE}}{I_q}$$

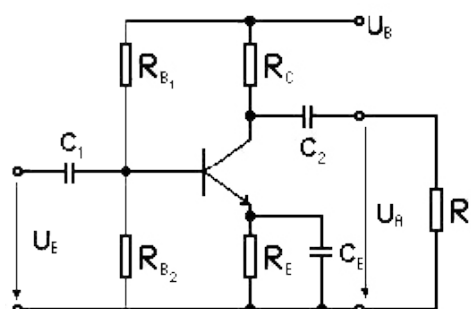
$$R_C = \frac{U_B - U_{CE}}{I_C + I_B + I_q}$$



15 Transistor-Grundsaltungen

15.1 Emitter-Schaltung

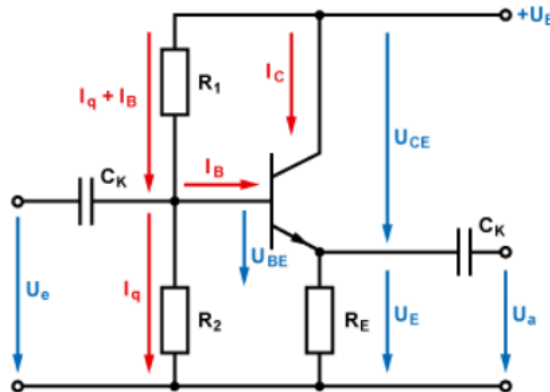
Wert	Formel	Bemerkung
r_e	$= R_1 \parallel R_2 \parallel r_{BE}$	wenn R_E mit C_E überbrückt
r_e	$= R_1 \parallel R_2 \parallel (r_{BE} + \beta \cdot R_E)$	ohne C_E
r_a	$= R_C \parallel r_{CE}$	
V_u	$= \frac{\beta}{r_{BE}} \cdot r_a$	ohne Last
V_u	$= \frac{\beta}{r_{BE}} \cdot (r_a \parallel R_L)$	mit Last
V_i	$= \beta \cdot \frac{r_{CE}}{r_{CE} + R_C}$	ohne Last
V_i	$= \beta \cdot \frac{r_{CE}}{r_{CE} + (R_C \parallel R_L)}$	mit Last
V_p	$= V_u \cdot V_i \quad \varphi = 180^\circ$	
C_E	$= \frac{h_{21E}}{2\pi f_{gu}(h_{11E} + R_i)}$	



15.2 Kollektor-Schaltung

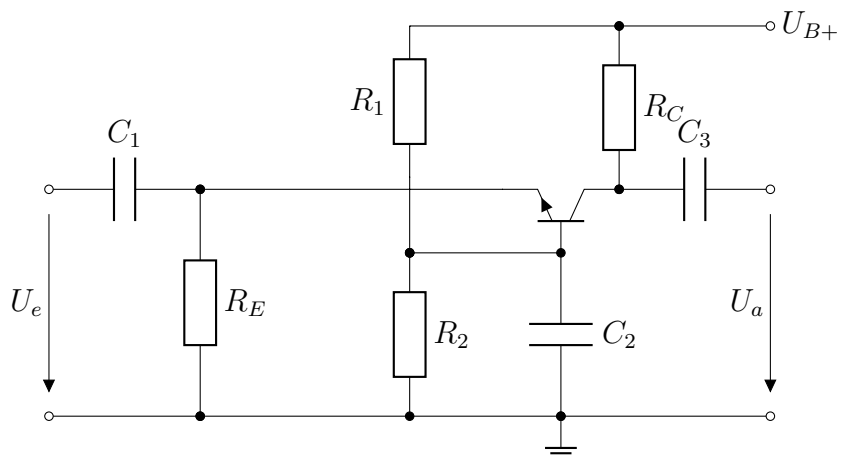
Anmerkung: BST = Basisspannteiler

Wert	Formel	Bemerkung
$r_{e_{oL}}$	$= R_1 \parallel [r_{BE} + \beta(R_E \parallel r_{CE})]$	ohne BST
$r_{e_{oL}}$	$= R_1 \parallel R_2 \parallel [r_{BE} + \beta(R_E \parallel r_{CE})]$	mit BST
$r_{e_{mL}}$	$= R_1 \parallel [r_{BE} + \beta(R_E \parallel r_{CE} \parallel R_L)]$	ohne BST
$r_{e_{mL}}$	$= R_1 \parallel R_2 \parallel [r_{BE} + \beta(R_E \parallel r_{CE} \parallel R_L)]$	mit BST
r_a	$= R_E \parallel \frac{r_{BE} \cdot R_i}{\beta}$	
V_u	$= \frac{\beta \cdot R_E}{\beta \cdot R_E + r_{BE}}$	ohne Last
V_u	$= \frac{\beta \cdot (R_E \parallel R_L)}{\beta \cdot (R_E \parallel R_L) + r_{BE}}$	mit Last
V_i	$= \beta \cdot \frac{r_{CE}(1+\beta)}{R_E + r_{CE}}$	ohne Last
V_i	$= \beta \cdot \frac{r_{CE}(1+\beta)}{(R_E \parallel R_L) + r_{CE}}$	mit Last
V_p	$= V_u \cdot V_i \quad \varphi = 0^\circ$	



15.3 Basis-Schaltung

Wert	Formel
r_e	$= R_E \parallel \frac{r_{BE}}{\beta}$
r_a	$= R_C \parallel r_{CE}$
V_u	$= \frac{\beta}{r_{BE}} \cdot r_a$
V_i	$= \frac{\beta}{\beta+1}$
V_p	$= V_u \cdot V_i$
φ	$= 0^\circ$



15.4 Selektivverstärker

Wert	Formel
f_o	$= \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$
$Q = Güte$	$= \frac{R \parallel r_{CE}}{X_C} = \frac{R \parallel r_{CE}}{X_L}$
X_C	$= \frac{1}{2\pi f \cdot C}$
X_L	$= 2\pi f \cdot L$

Wert	Formel
b_{oL}	$= \frac{f_o}{Q} = \frac{f_o \cdot X_C}{R \parallel r_{CE}} = \frac{f_o \cdot X_L}{R \parallel r_{CE}}$
b_{mL}	$= \frac{f_o \cdot X_C}{R \parallel r_{CE} \cdot R_L} = \frac{r_o \cdot X_L}{R \parallel r_{CE} \parallel R_L}$
V_u	$= Y_{21}(R \parallel r_{CE})$

15.5 Schaltverstärker

$$\text{Schaltfrequenz } f_{\max} = \frac{1}{t_{\text{ein}} + t_{\text{aus}}} \quad R_1 = \frac{U_B - U_{CX}}{I_{BX}} \quad R_2 = \frac{U_e - U_{BE}}{I_{BX}}$$

15.5.1 Schaltverstärker mit Hilfsspannungen

$$I_{BX} = \frac{\ddot{u} \cdot U_B}{R_c \cdot B} \quad U_{IH} \geq R_1(I_{BX} + \frac{U_{BEX} + |U_H|}{R_2}) + U_{BEX}$$

$$\frac{R_1 \cdot (U_{BEX} + |U_H|)}{U_{IH} - U_{BEX} - I_{BX} \cdot R_1} \leq R_2 \leq \frac{R_1(U_{BEY} + |U_H|)}{U_{IL} - U_{BEY}}$$

$$R_1 = \frac{(U_{IH} - U_{BEX})(U_{BEY} + U_H) - (U_{BEX} + U_H)(U_{IL} - U_{BEY})}{I_{BX} \cdot (U_{BEY} + U_H)}$$

$$\text{standardmäßig: } U_{BEX} = 0,8V \quad U_{BEY} = 0,2V$$

15.6 Feldeffekt-Transistoren

$$\text{Vorwärtssteilheit } y_{21} = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} = S \quad \text{Ausgangsleitwert } y_{22} = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{DS}} = \frac{1}{r_{DS}}$$

$$\text{Automatische Gate-Spannungs-Erzeugung } U_{RS} = I_D \cdot R_S \quad P_{\text{tot}} = U_{DS} \cdot I_D$$

$$\text{Gatespannungserzeuger mit Gatespannungsteiler } R_1 = \frac{U_B - U_{GS} - U_{RS}}{I_q} \quad R_2 = \frac{U_{GS} + U_{RS}}{I_q}$$

15.6.1 Source-Schaltung

Wert Formel

$$C_S = 0,2 \cdot \frac{y_{21}}{f_{gu}}$$

$$C_1 = \frac{1}{2\pi f_{gu}(R_i + r_e)}$$

$$C_2 = \frac{1}{2\pi f_{gu}(R_L + r_a)}$$

$$R_G = \frac{U_{GS}=0,5V}{I_{GSS}}$$

$$R_{GS} = \frac{U_{GS}}{I_{GSS}}$$

$$R_S = \frac{U_{GS}}{I_D} = \frac{U_{RS}}{I_D}$$

$$r_a = R_D \parallel r_{DS}$$

$$r_{DS} = \frac{1}{y_{22}}$$

$$R_D = \frac{U_B - U_{DS} - [U_{RS} \circ U_{GS}]}{I_D} = \frac{U_D}{I_D}$$

$$r_e = \frac{R_G \cdot R_{GS}}{R_G + R_{GS}} = R_G \parallel R_{GS}$$

$$r_e = R_1 \parallel R_2 \parallel R_{GS}$$

$$V_U = y_{21} \cdot r_a$$

$$U_{RG} = -I_{GSS} \cdot R_G \quad \varphi = 180^\circ$$

Bemerkung

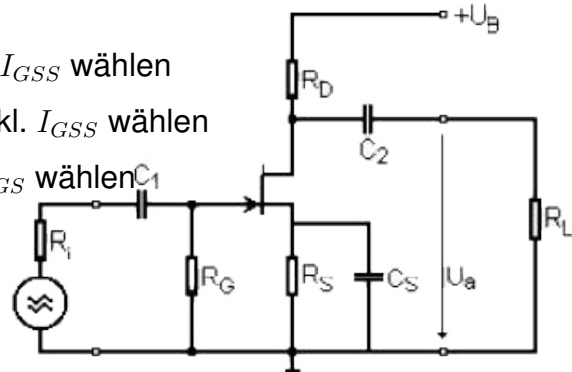
größere I_{GSS} wählen

gr. U_{GS} , kl. I_{GSS} wählen

kleine U_{GS} wählen

oder:

für Gatesp. Teiler

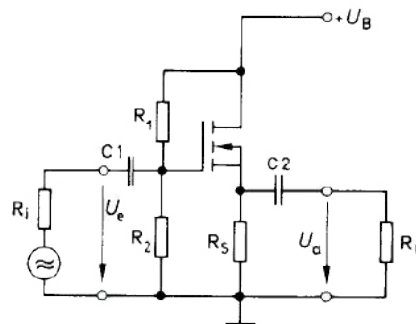
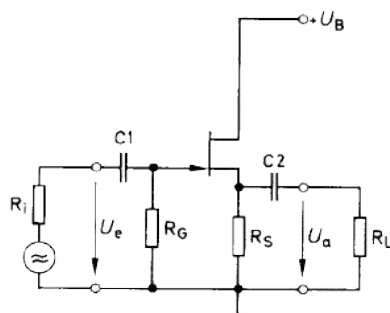


15.6.2 Drain-Schaltung

$$r_e = R_{GS}(1 + y_{21} \cdot R_S) \parallel R_G \text{ bzw. bei Gatespannungsteiler: } r_e = R_{GS}(1 + y_{21} \cdot R_S) \parallel R_1 \parallel R_2$$

$$r_a = R_S \parallel \frac{1}{y_{21}} \quad V_U = \frac{y_{21} \cdot R_S}{1 + y_{21} \cdot R_S} \varphi = 0^\circ$$

$$R_G = \frac{-U_{GS}}{I_{GSS}} \quad R_S = \frac{U_{RS}}{I_D} \quad R_{GS} = \frac{-U_{GS}}{-I_{GSS}} \quad R_1 = \frac{U_B - U_{GS} - U_S}{I_q} \quad R_2 = \frac{U_{GS} + U_S}{I_q}$$



16 OPV - Operationsverstärker

Wert Formel

$$V_{ldb} = 20 \lg \frac{U_a}{U_e} \text{ (Verstärkung)}$$

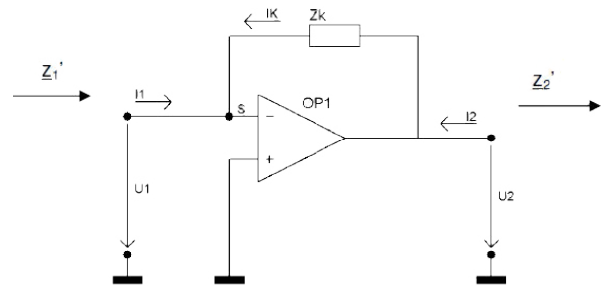
$$I_K = \frac{U_2 - U_1}{Z_K} \quad I_1 + I_K = 0$$

$$\frac{Z_1}{I_1} = \frac{U_1}{-I_K}$$

$$\frac{Z_1}{I_1} = \frac{Z_K}{-V_0 + 1}$$

$$U_1 = \frac{U_2}{V_0}$$

$$z_2 = \frac{z_K}{1 + \frac{1}{-V_0}}$$



16.1 Anwendungen mit frequenzunabhängiger Gegenkopplung

16.1.1 Invertierender Verstärker/Umkehrverstärker

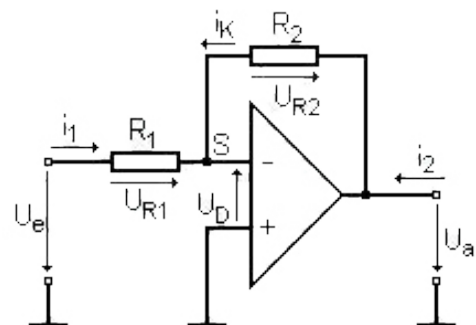
Wert Formel

$$r_e = R_1$$

$$r'_a = r_a \cdot \frac{V}{V_0}$$

$$U_a = -\frac{R_2}{R_1} \cdot U_e$$

$$V = -\frac{R_2}{R_1}$$



Einfluss der endlichen Verstärkung
auf einen realen OPV:

$$V = -\frac{V_0 \cdot R_K}{R_K + R_1 \cdot V_0 + R_1}$$

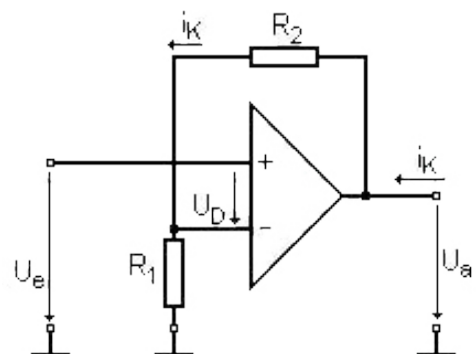
16.1.2 Nichtinvertierender Verstärker/Elektrometerverstärker

Wert Formel

$$V = 1 + \frac{R_K}{R_1}$$

$$U_a = \left(1 + \frac{R_K}{R_1}\right) \cdot U_e$$

$$R_2 \rightarrow R_K$$

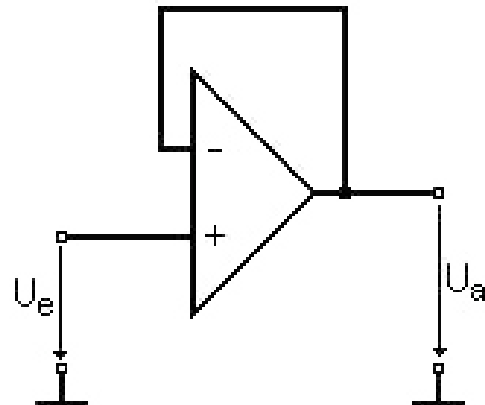


16.1.3 Spannungsfolger

Wert Formel

$$U_a = U_e$$

$$V = 1$$



16.1.4 Addierverstärker

Wert Formel

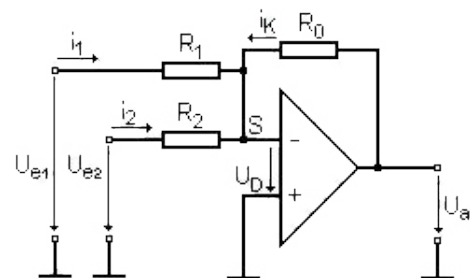
$$-U_a = (I_1 + I_2) \cdot R_0$$

$$= \frac{R_0}{R_1} \cdot U_{e1} + \frac{R_0}{R_2} \cdot U_{e2}$$

$$-U_a = (U_{e1} + U_{e2}) \cdot \frac{R_0}{R_1} \leftarrow \text{nur für } R_1 = R_2 !$$

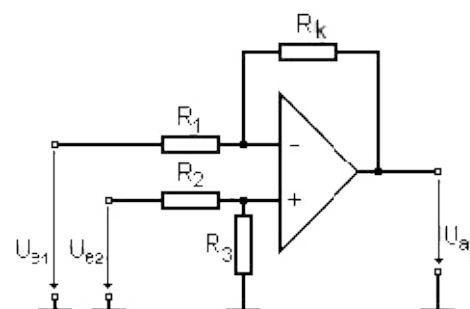
$$-I_K = I_1 + I_2$$

$$V = 1$$



16.1.5 Subtrahierverstärker

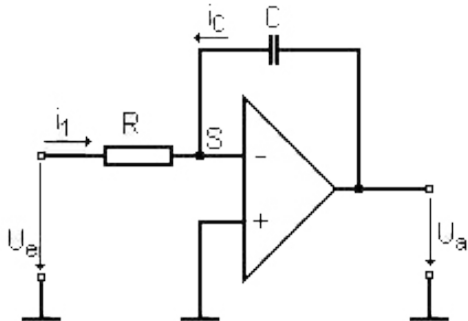
$$-U_a = \frac{R_K}{R_1} \cdot U_{e1} - \left(1 + \frac{R_K}{R_1}\right) \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot U_{e2}$$



16.2 OPV mit frequenzunabhängiger Gegenkopplung

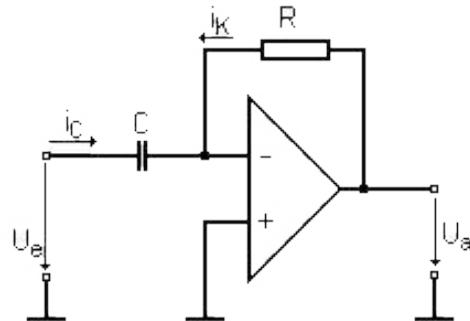
16.2.1 Integrierverstärker

$$-U_a = \frac{1}{RC} \cdot \int U_e(t) dt + U_0$$



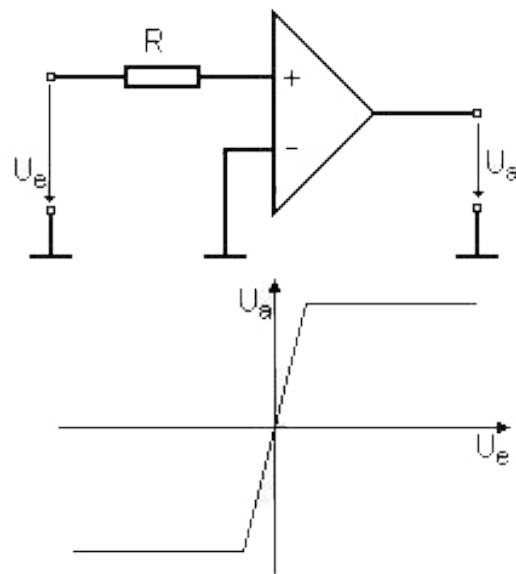
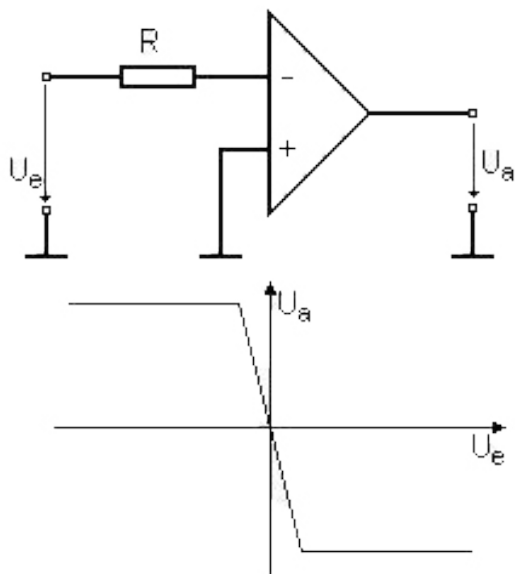
16.2.2 Differenzierer

$$i_c = C \cdot \frac{du_c}{dt} \quad i_k = \frac{U_a}{R} = -i_c \quad -U_a = RC \cdot \frac{du_e}{dt}$$



16.2.3 Komparator/Vergleicher

invertierter Komparator / nicht-invertierter Komparator



16.3 Schmitt-Trigger

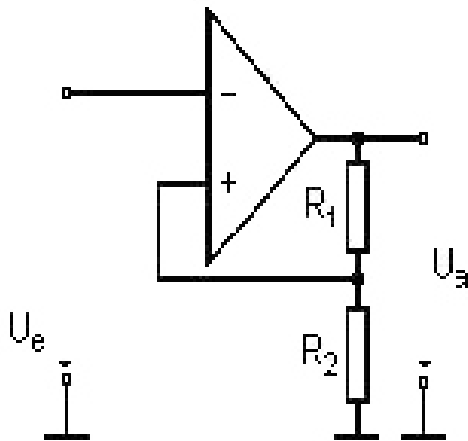
16.3.1 invertierter SWS

Wert Formel

$$U_{ein} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{a-}$$

$$U_{aus} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{a+}$$

$$U_{Hys} = U_{aus} - U_{ein}$$

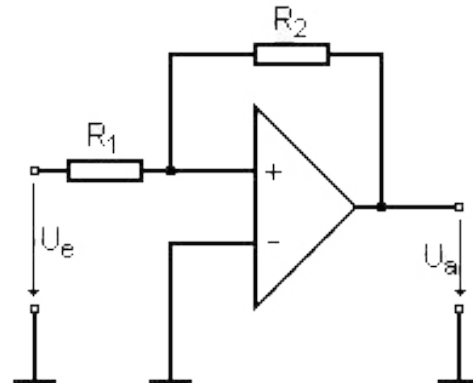


16.3.2 nichtinvertierter SWS

Wert Formel

$$U_{ein} = -\frac{R_1}{R_2} \cdot U_{a-}$$

$$U_{aus} = -\frac{R_1}{R_2} \cdot U_{a+}$$

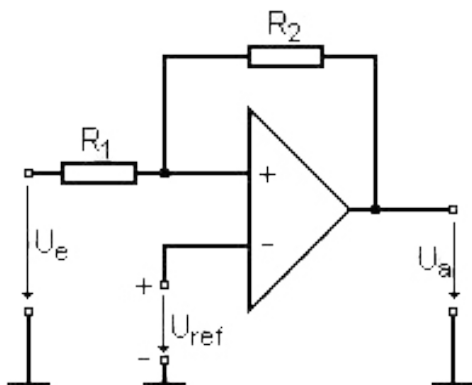


16.3.3 nichtinvertierter SWS mit Referenzspannungsquelle

Wert Formel

$$U_{ein} = -\frac{R_1}{R_2} \cdot U_{a \min} + U_{ref} \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)$$

$$U_{aus} = -\frac{R_1}{R_2} \cdot U_{a \max} + U_{ref} \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)$$



16.3.4 invertierter SWS mit Referenzspannungsquelle

Wert Formel

$$U_{ein} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{a \min} + U_{ref} \left(1 - \frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)$$

$$U_{aus} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{a \max} + U_{ref} \left(1 - \frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)$$

