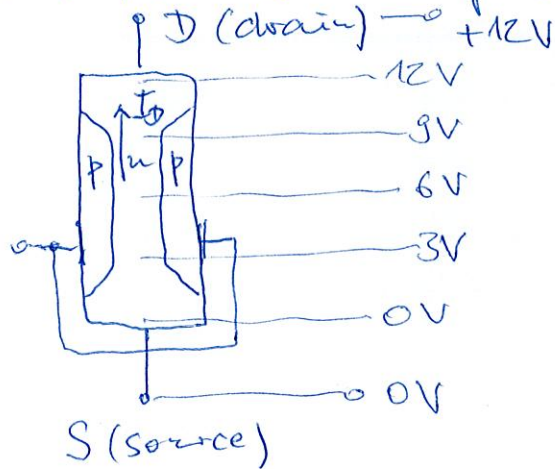


5) Unipolare Transistoren

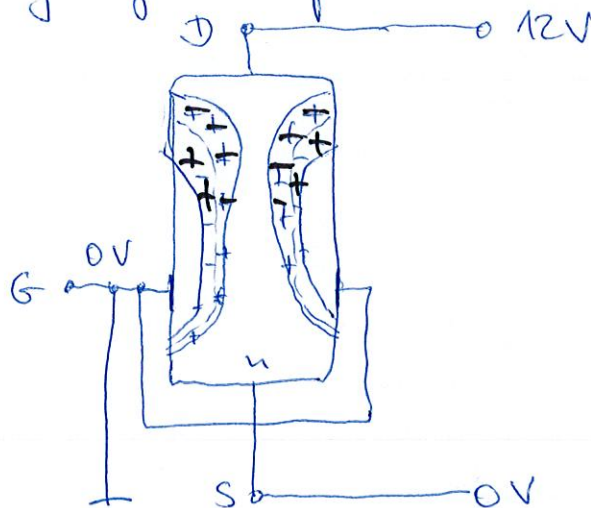
(21)

5.1) Sperrschicht - Feldeffekttransistoren (FET)

- n-Kanal und p-Kanal-Typen, Grundaufbau

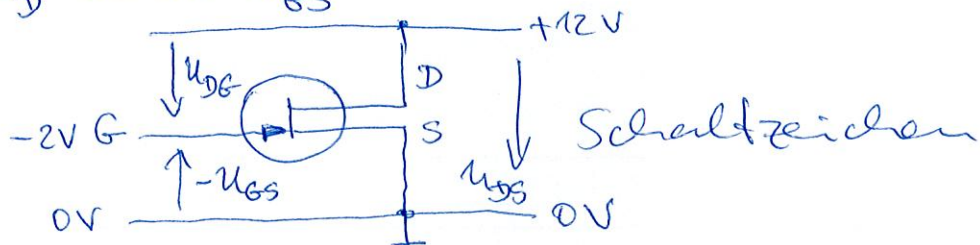


- wird eine Spannung U zwischen S (source) und D (drain) angelegt, fließt ein Elektronenstrom, der von der angelegten Spannung und dem Bahnwiderstand des n-Kristallstrecke abhängt
- beide p-Zonen sind leitend miteinander verbunden \rightarrow Anschluss G (gate)
- wird G an Nullpotential gelegt, also mit S verbunden, so sind die beiden pn-Übergänge in Sperrrichtung gepolt:

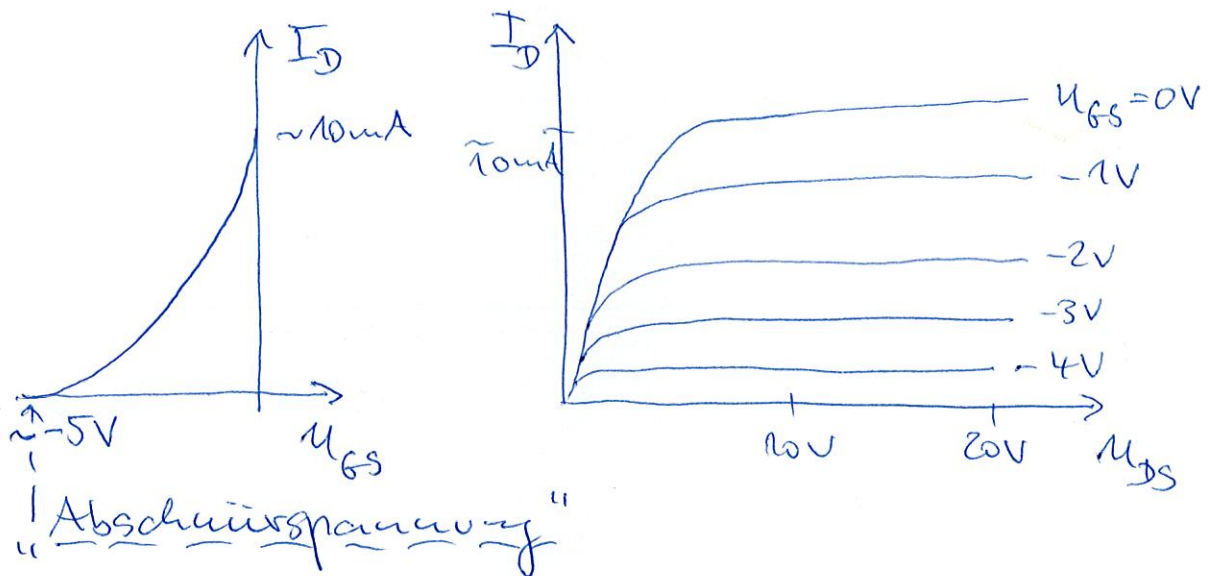


- Ausbildung zweier Sperrschichten (Raumladungszonen), die um so breiter sind, je größer die in Sperrrichtung wirkende Spannung ist \Rightarrow Sperrschicht nimmt von S nach D zu

- gelangt ein e^- in eine Sperrschicht, wird es in Richtung der neutralen n-Schicht herausgedrängt
- als Stromwegpfad steht den e^- nur die neutrale n-Schicht \equiv Kanal zur Verfügung
- je negativer die Spannung U_{GS} , desto
 - + breiter die Sperrschichten
 - + geringer der Kanalquerschnitt
 - + größer der Kanalwiderstand
 - + kleiner der Strom I_D
- dabei leistungslose Steuerung des Stromes durch I_D und U_{GS}

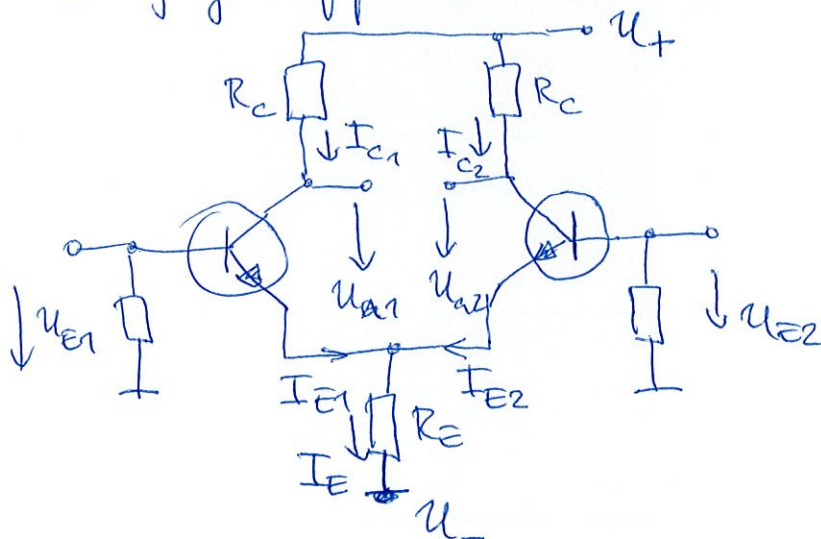


- Kennlinien:



6.1 Differenzverstärker

- symmetrischer Aufbau mit zwei möglichst gleichen und thermisch eng gekoppelten Transistoren:



- zwei Spannungsquellen U_+ und U_- , beide auf Massepotential bezogen
- für $U_{E1} = U_{E2} = 0$: (beide U_{BE} setzen gleich)

$$I_E = \frac{U_- - U_{BE}}{R_E} \approx I_{E1} + I_{E2} \quad \text{mit } I_{E1} = I_{E2}$$

$$\Rightarrow I_E = I_B + I_C \approx I_C \Rightarrow I_{C1} = I_{C2}$$

$$\text{aus } U_{A1} = U_+ - I_{C1} R_C \text{ und } U_{A2} = U_+ - I_{C2} R_C$$

$$\text{folgt } U_{A1} = U_{A2}$$

- für $U_{E1} > U_{E2}$: $U_{BE1} > U_{BE2}$, d.h. T_1 wird stärker leitend als T_2

$$\Rightarrow I_{E1} > I_{E2} \text{ und } I_{C1} > I_{C2}$$

$$\Rightarrow U_{A1} < U_{A2}$$

$$\Rightarrow U_{A12} = U_{A1} - U_{A2} < 0, \text{ d.h.}$$

$$\Delta U_A = v_D \Delta U_D = v_D (U_{E1} - U_{E2})$$

v_D : Differenzverstärkung (= Spannungsverstärkung einer Emittterstufe)

- bei Änderung der Eingangsspannung U_D sind die Änderungen der einzelnen Ausgangsspannungen U_{A1} und U_{A2} entgegengesetzt gleich:

$$I_E = \text{const} = I_{E1} + I_{E2}$$

$$\Rightarrow \Delta I_{E1} = -\Delta I_{E2} \quad , \quad \Delta I_{C1} = -\Delta I_{C2}$$

$$\Rightarrow \Delta U_{A1} = -R_C \Delta I_{C1} = R_C \Delta I_{C2} = -\Delta U_{A2}$$

und damit

$$\Delta U_A = \Delta U_{A1} - \Delta U_{A2} = 2\Delta U_{A1}$$

$$\Delta U_{A1} = -\Delta U_{A2} = \frac{\Delta U_A}{2}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta U_{A1}}{\Delta U_D} = -\frac{\Delta U_{A2}}{\Delta U_D} = \frac{v_D}{2}$$

6.1.1 Gleichtaktverstärkung, -unterdrückung

- $I_E = \text{const}$ gilt jedoch nicht immer, denn liegt eine Gleichtaktspannung $U_{gl} = U_{E1} = U_{E2}$ an beiden Eingängen, ist

$$I_E = I_{E1} + I_{E2} = \frac{U_{RE}}{R_E} = \frac{U_{gl} - U_{BE} + U_-}{R_E} = I_E(U_{gl})$$

- mit $U_- = \text{const}$ und $U_{BE} \approx \text{const}$ gilt

Ende
Folienlösung

$$\Delta I_E = \Delta I_{E1} + \Delta I_{E2} = \frac{\Delta U_{RE}}{R_E} \approx \frac{\Delta U_{gl}}{R_E}$$

- wegen der Symmetrie der Schaltung ist

$$\Delta I_{E1} = \Delta I_{E2} = \frac{\Delta I_E}{2} \approx \frac{1}{2} \frac{\Delta U_{gl}}{R_E}$$

$$\Rightarrow \Delta U_{A1} = -R_C \Delta I_{E1} = -\frac{R_C}{R_E} \frac{\Delta U_{gl}}{2}$$

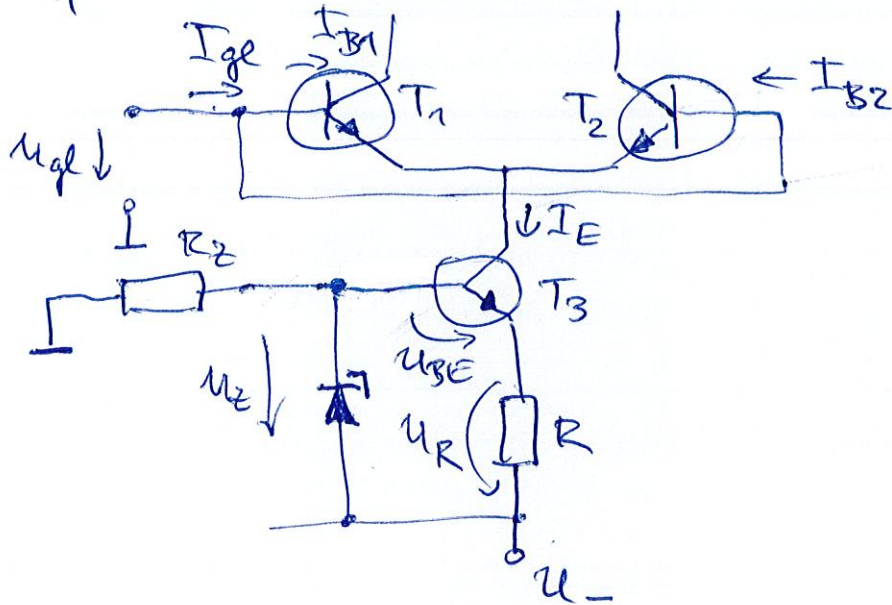
- Gleichtaktverstärkung v_{gl} :

$$v_{gl} = \frac{\Delta U_{A1}}{\Delta U_{gl}} = \frac{\Delta U_{A2}}{\Delta U_{gl}} = -\frac{R_C}{2R_E}$$

- Forderung $v_D \gg v_{gl}$:

$$v_D \approx -\frac{R_C \beta}{r_{BE}} \gg v_{gl} = -\frac{R_C}{2R_E} \Rightarrow R_E \gg \frac{r_{BE}}{2\beta}$$

- große Werte von R_E durch Konstantstromquelle erreichbar:



- T_3 gibt den Ausgangsstrom

$$I_E = \frac{U_R}{R} = \frac{U_Z - U_{BE}}{R} = \text{const}$$

an den Differenzverstärker T_1, T_2 ab

- Gleichfaktunkordrückung G :

$$G = \frac{v_D}{v_{gl}} > 10^5$$

- Gleichtaktarngswiderstand r_{gl} :

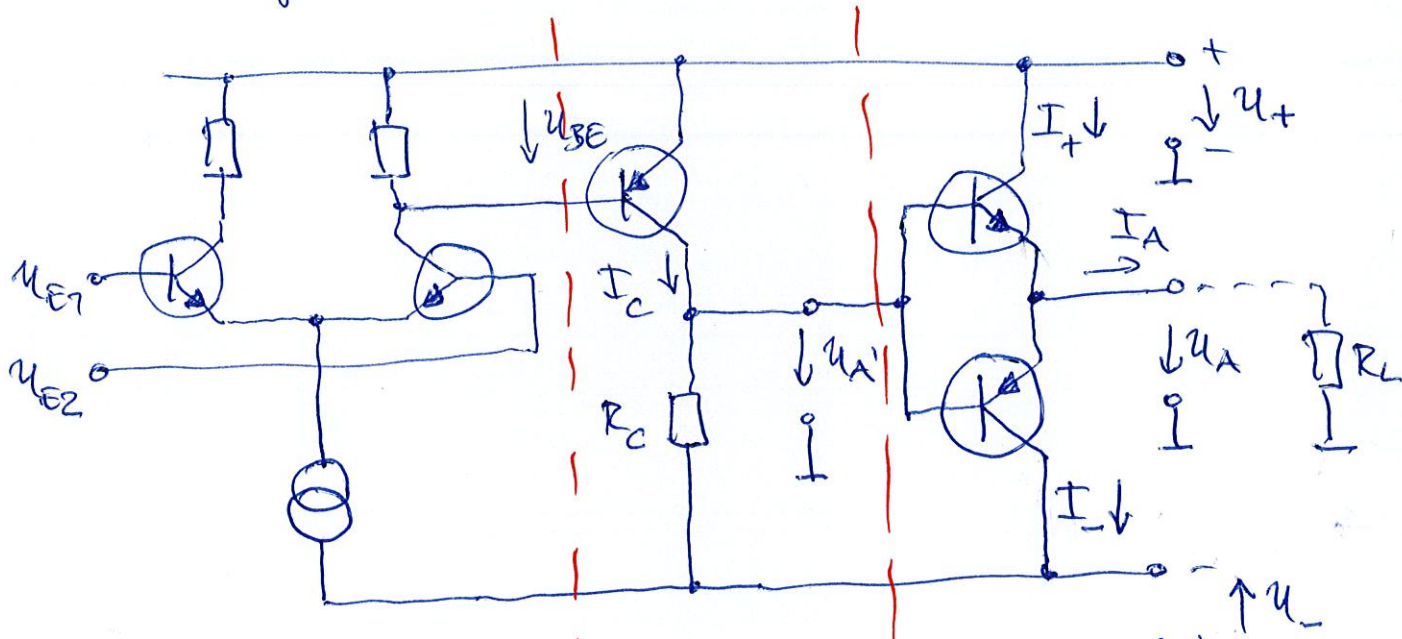
$$r_{gl} = \frac{\Delta u_{gl}}{\Delta I_{gl}} = \frac{\Delta u_{gl}}{\Delta I_E} \beta = \beta R_E > 10^8 \Omega$$

- mit FET $I_{gl} < 1 \mu A$

Mehrstufiger 6.2 Operationsverstärker

(26)

Aufbau:



(symm.)

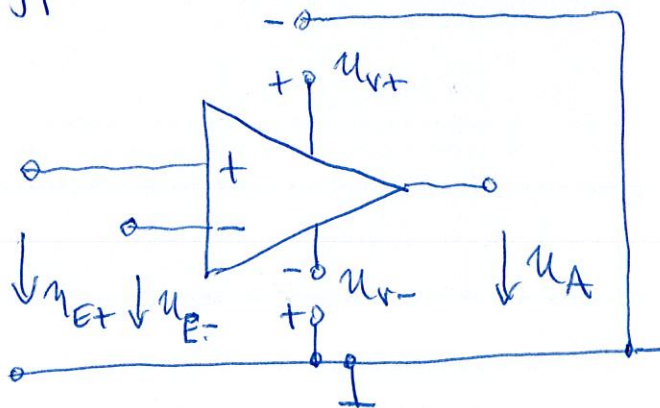
Differenzverstärker
Im Eingang mit
hohem Gleichtakt-
Eingangsgegenstand

ungymm.
Verstärker-
stufe zur
Erzeugung
eines max.
Spannungs-
hubes

Gegentakt-
Endstufe
mit nieder-
ohmigem
Ausgang

Gesamtverstärkung $V_0 = \frac{\Delta u_A}{\Delta u_E} = V_1 \cdot V_2 \dots$
als Produkt der einzelnen Verstärker-
stufen heißt Leertlaufverstärkung

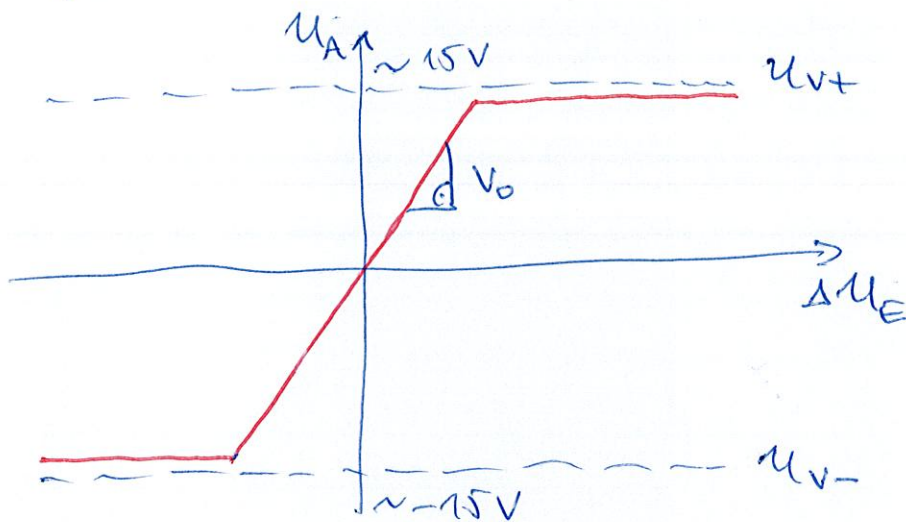
typische Werte: $10^4 < V_0 < 10^6$



Schaltsymbol
eines OPV

- Versorgungsspannungen werden nicht
eingezeichnet
- Standardtyp: "741"

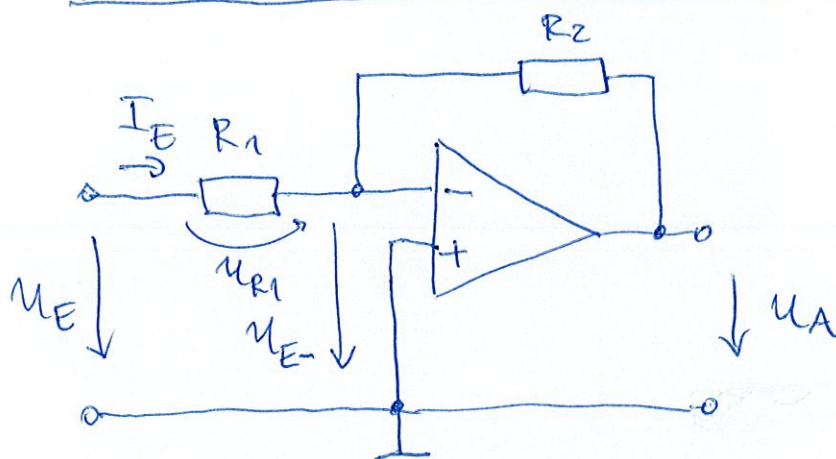
- „Kennlinie“ des OPV:



↔ Sättigungsbereich linearer Bereich ↔ Sättigungsbereich

- linearer Bereich im $\mu\text{V}/\text{mV}$ -Bereich, daher gegenkopplung: Ausgangsspannung wird so auf den Eingang zurückgeführt, dass die Wirkung der Eingangsspannung abgeschwächt wird

6.2.1 Invertierender Verstärker



- es gilt stets $u_A = V_0 (u_{E+} - u_{E-})$
mit $u_{E+} = 0$
- $u_{E-} = u_E - u_{R1} = u_E - I_E R_1$
 $u_E = (R_1 + R_2) I_E + u_A$
- $\leadsto u_{E-} = u_E - (u_E - u_A) \frac{R_1}{R_1 + R_2}$
- mit $u_{E+} = 0$ ergibt dies:

$$u_A = v_o u_E \frac{1-k}{1-v_o k} \quad \text{mit}$$

$$k = \frac{R_1}{R_1 + R_2} : \text{Koppelfaktor}$$

$$\Rightarrow v_{kl} = \frac{u_A}{u_E} = v_o \frac{1-k}{1-v_o k} = \frac{1-k}{k} \frac{v_o k}{1-v_o k} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1-\frac{1}{v_o k}}$$

$$\approx -\frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{1}{v_o k}\right) = -\frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{1}{v_s}\right)$$

$v_{kl} =$ ~~Kleinenverstärkung~~

$v_s = v_o k$: Schleifenverstärkung

• jedoch $1/v_s = 1/(v_o k) \ll 1$, somit ist die Kleinenverstärkung nur durch die äußere Beschaltung gegeben

• idealer OPV:

$$+ v_o \rightarrow \infty$$

$$+ u_{E+} \approx u_{E-}$$

$$+ I_{E+} = I_{E-} = 0$$

• mit $u_{E+} = u_{E-}$ und $u_{E+} = 0$ muss auch der invertierende Eingang auf Nullpotential liegen \rightarrow virtuelle Masse

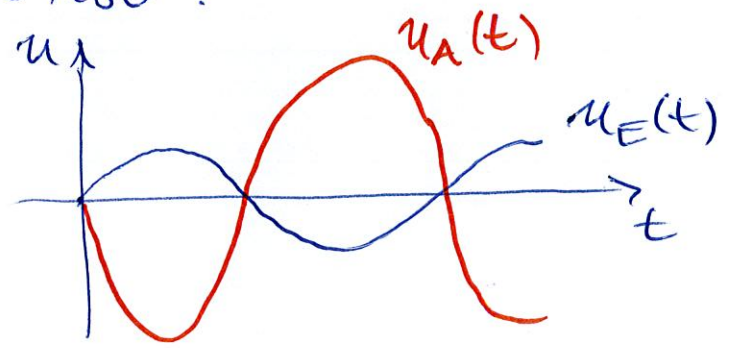
• u_E fällt ganz an R_1 ab, ebenso u_A ganz an R_2 :

$$I_E = \frac{u_E}{R_1} = -I_A = -\frac{u_A}{R_2} \quad (\text{Knotenregel mit } I_{E-} = 0)$$

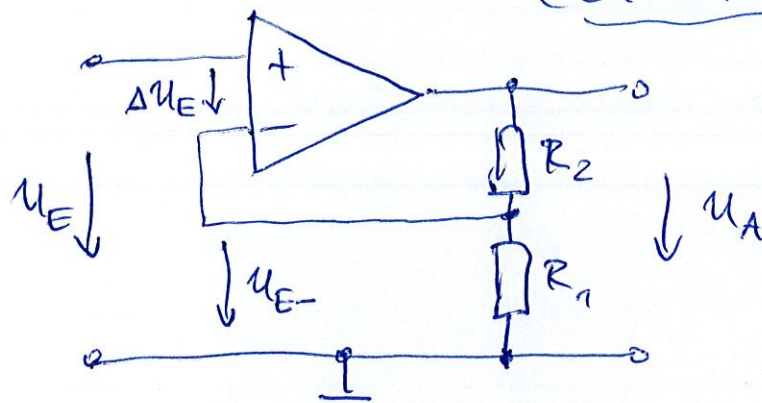
$$\Rightarrow u_A = -\frac{R_2}{R_1} u_E$$

• Eingangswiderstand: $r_E = \frac{du_E}{dI_E} = R_1$

• Minuszeichen bedeutet Phasendrehung um 180° :



6.2.2 Nichtinvertierendes Verstärker (29) (Elektrometerverstärker)



Teil der Ausgangsspannung wird über einen Spannungsteiler R_1, R_2 auf den invertierenden Eingang zurückgeführt:

$$U_{E+} = U_E$$

$$U_{E-} = U_A \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$\Rightarrow U_A = v_o (U_{E+} - U_{E-}) = v_o \left(U_E - U_A \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)$$

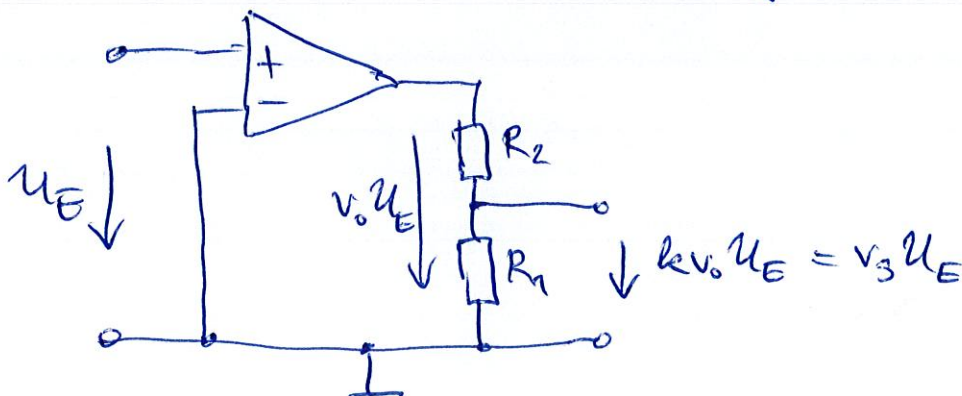
$$= v_o (U_E - k U_A) \quad \text{mit}$$

$$k = \frac{R_1}{R_1 + R_2} < 1 \quad (\text{Koppelfaktor})$$

$$\Rightarrow v_{ke} = \frac{U_A}{U_E} = \frac{v_o}{1 + k v_o} = \frac{1}{k} \frac{1}{1 + \frac{1}{k v_o}}$$

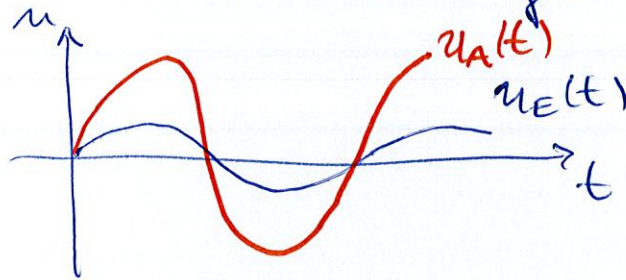
(Kleinenverstärkung)

$v_s = k v_o$: Schleifenverstärkung
(Verstärkung zwischen der Eingangs-klemme und dem Ausgang ohne Gegenkopplung)

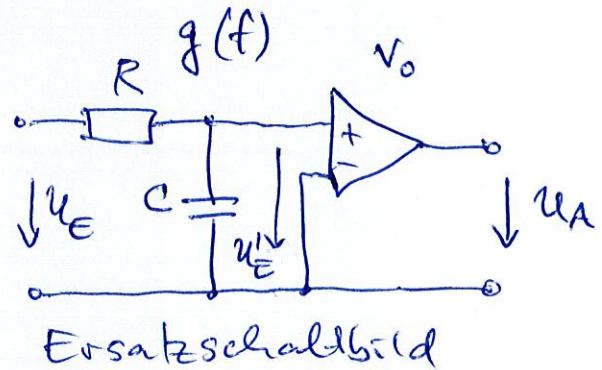
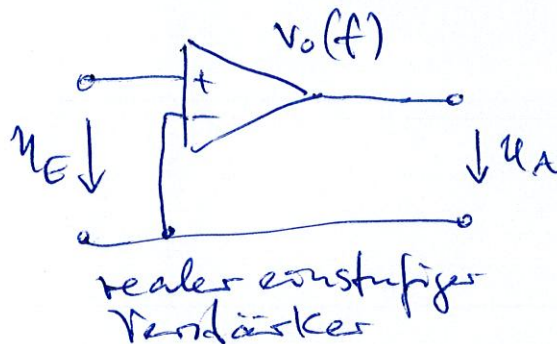


- für $k v_o \gg 1$: $v_{be} \approx \frac{1}{k} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$ (30)

- keine Phasendrehung:



- Bandbreite:



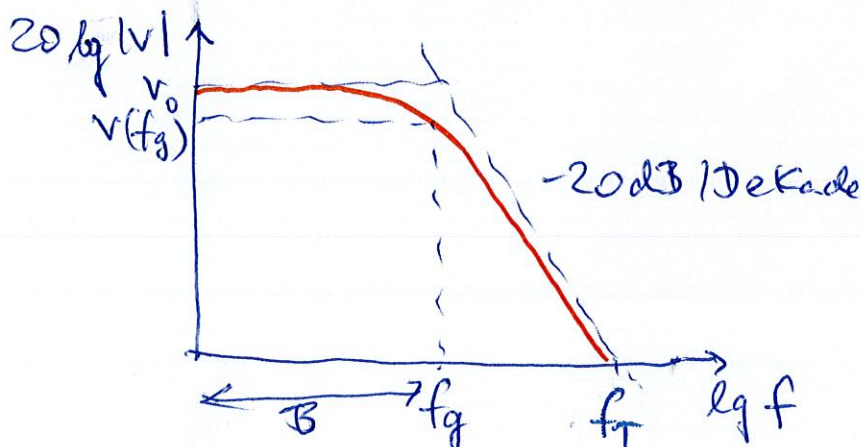
- Frequenzabhängigkeit der Verstärkung:

$$v_o(f) = v_o(0) \cdot g(f) \quad (\text{Übertragungsfkt. } g(f))$$

$$g(f) = \frac{x_c}{x_c + R} = \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_g}} \quad \text{mit } f_g = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$\Rightarrow |v_o(f)| = \frac{v_o}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_g}\right)^2}}, \quad \tan \varphi = -\frac{f}{f_g}$$

→ Tiefpassverhalten



- f_T : Transitfrequenz ($v_o(f_T) \approx 1$)

- B : Bandbreite

- durch Gegenkopplung wird B erhöht