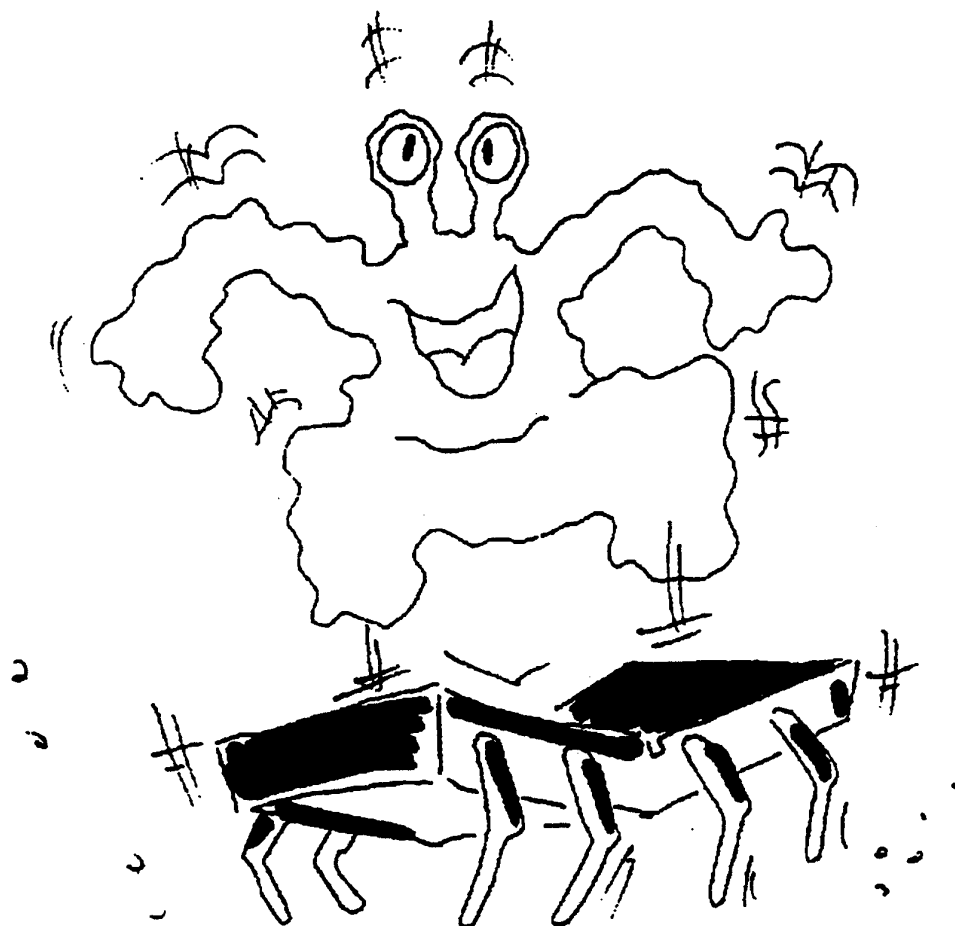
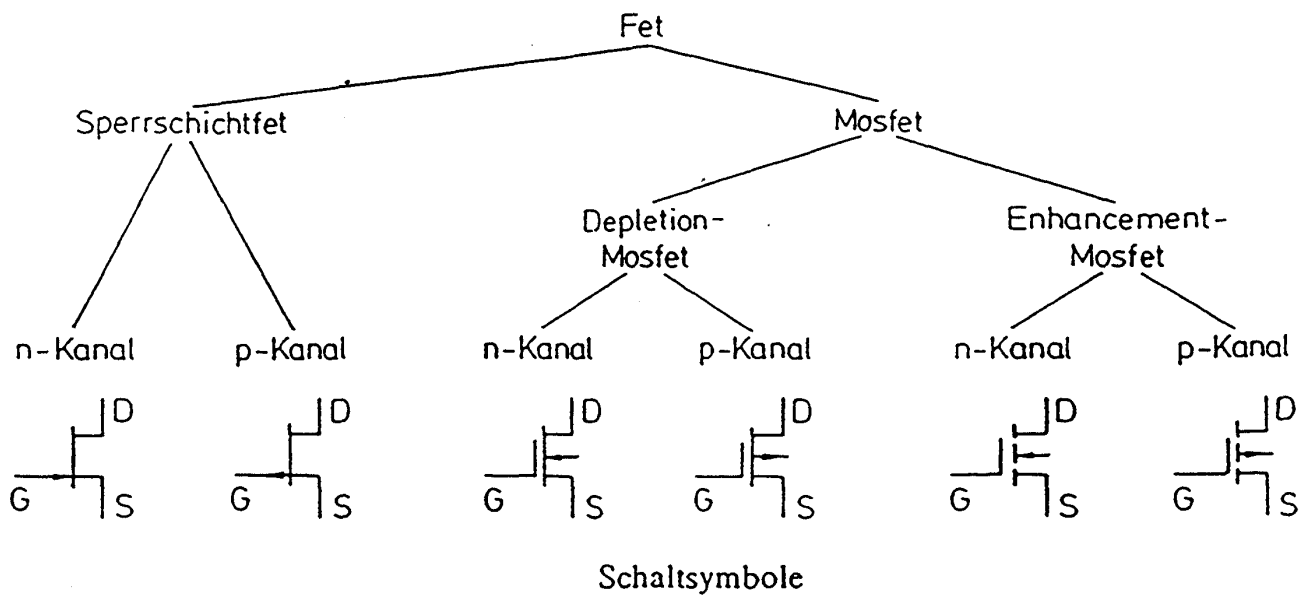


Übungsbeispiele aus  
**BAUELEMENTE DER  
ELEKTRONIK**  
3. Teil (FET & OPV)





## Unterschiede zu Bipolartransistor:

quadratische Steuerkennlinie



Steilheit geringer



Verstärkung geringer

faktisch kein Gate-Strom



reine Spannungsansteuerung

Kennlinie geht exakt durch Null



$$U_{DS} = 0 \Rightarrow I_D = 0$$

Unterschied zwischen Bipolartransistor und Feldeffekttransistor:

BIP	FET
Basisstrom	kein Basisstrom
$U_{BE} = U_f = 0.6V - 0.7V$	$U_{GS} = f(I_D)$
Steilheit groß	Steilheit klein
Übersteuerungsbereich:	Ohmscher Bereich:
$U_{CE} < 0.2V$	$U_{DS} \leq f(U_{GS}) = \text{bis zu einigen } V$

n-Sperrschichtfet:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_p}\right)^2$$

$$U_{GS} = U_p \left(1 - \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}}\right)$$

$$g_m = \frac{dI_D}{dU_{GS}} = \frac{2\sqrt{I_D I_{DSS}}}{-U_p}$$

Transistor im Stromquellenbereich für:

$$U_{GD} \leq U_p$$

$$U_{DG} \geq -U_p$$

$$U_{DS} \geq U_{GS} - U_p$$

Transistor sperrt:

$$U_{GS} \leq U_p$$

Für p-Sperrschichtfets alle Spannungs- und Strompfeile umdrehen.

n-Mosfet:

Ohmscher Bereich:

$$I_D = \beta \left( (U_{GS} - U_T) U_{DS} - \frac{1}{2} U_{DS}^2 \right)$$

Stromquellenbereich:

$$I_D = \frac{\beta}{2} (U_{GS} - U_T)^2$$

$$g_m = \sqrt{2\beta I_D}$$

Übergang für:

$$U_{GD} = U_T$$

$$U_{DS} = U_{GS} - U_T$$

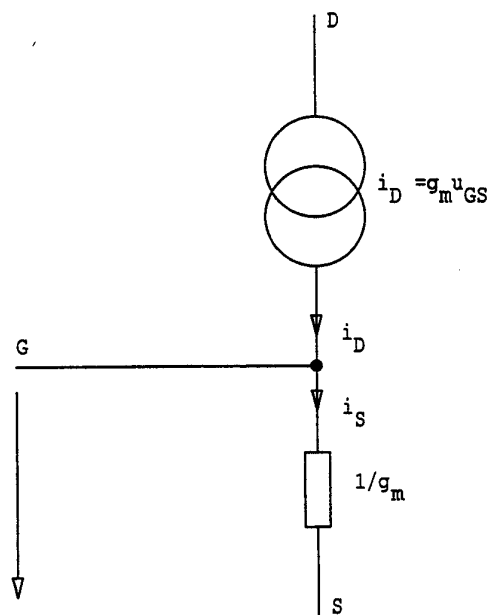
Transistor sperrt:

$$U_{GS} \leq U_T$$

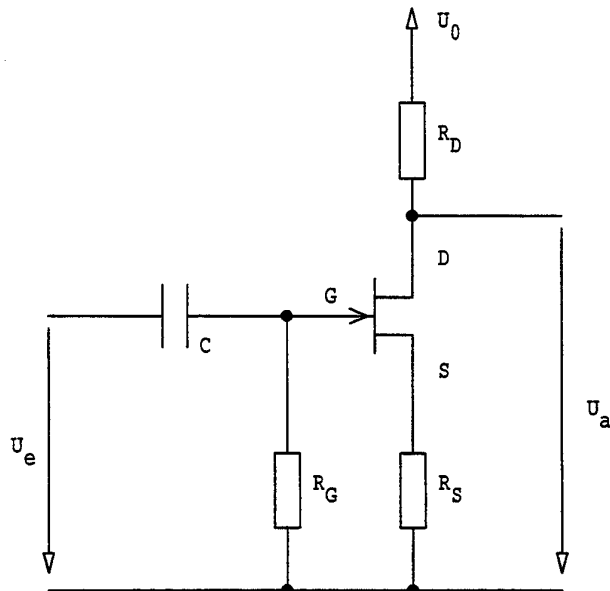
p-Mosfet: alle Spannungs- und Strompfeile umdrehen:

$$\text{z.B.: } I_D = \beta \left( (U_{SG} - \bar{U}_T) U_{SD} - \frac{1}{2} U_{SD}^2 \right)$$

Kleinsignalersatzschaltbild für FETs im Stromquellenbereich. Linearisierung der Steuerkennlinie (darf nur verwendet werden, wenn der FET gering um den Arbeitspunkt angesteuert wird)



### 1) Source-Schaltung für JFET



### Source-Schaltung für JFET

$$U_{R_G} = 0 \Rightarrow U_{GS} = -I_D R_S$$

$$U_{DS} = U_0 - I_D (R_S + R_D)$$

Stromquellenbereich:

$$U_{DS} \geq U_{GS} - U_p$$

$$U_0 - I_D (R_S + R_D) \geq -I_D R_S - U_p$$

$$U_0 - I_D R_D \geq -U_p$$

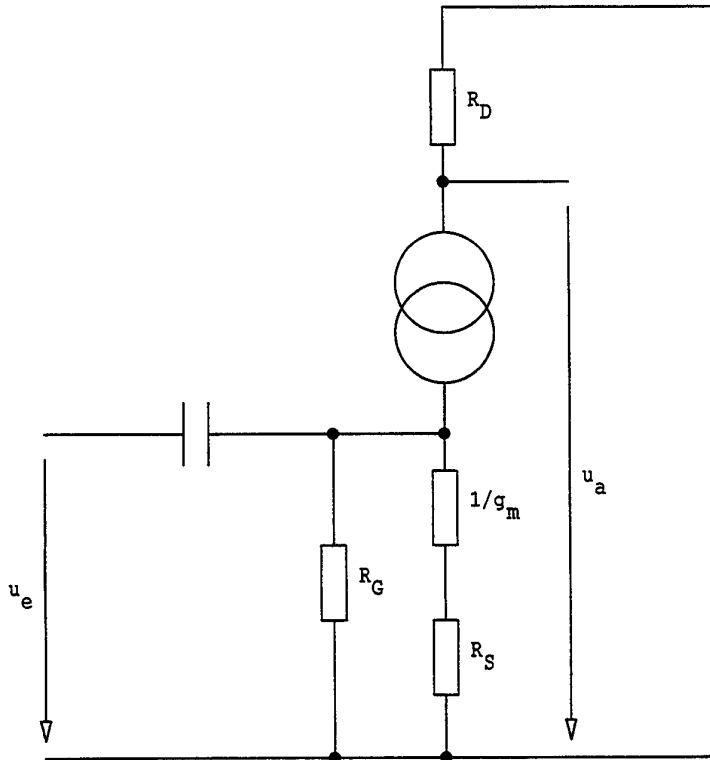
$$-I_D R_D \geq -U_p - U_0$$

$$R_D \leq \frac{U_0 + U_p}{I_{DSS}} \leq \frac{U_0 + U_p}{I_D} = \frac{U_0 + U_p}{I_{D0} + \hat{i}}$$

$R_D$  muß kleiner als  $(U_0 + U_p)/I_{DSS}$  sein, damit der FET immer im Stromquellenbereich arbeitet.

Kleinsignalgrößen der Source-Schaltung:

Kleinsignalersatzschaltung



$$r_e = R_G$$

$$r_a = R_D$$

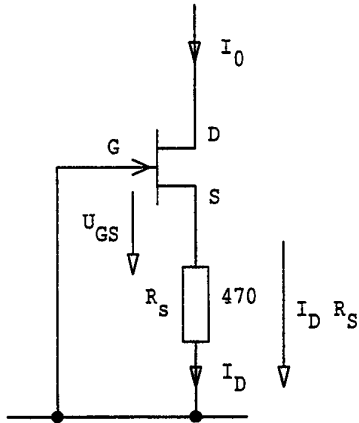
$$u_e = i_D(1/g_m + R_S)$$

$$u_a = -i_D R_D$$

$$v_u = \frac{u_a}{u_e} = \frac{-i_D R_D}{i_D(1/g_m + R_S)} = -\frac{R_D}{1/g_m + R_S}$$

$$v_{u_{max}} = -g_{m_{max}} \frac{U_0 + U_p}{I_{DSS}} = -\frac{2I_{DSS}}{-U_p} \frac{U_0 + U_p}{I_{DSS}} = \frac{2(U_0 + U_p)}{U_p}$$

## 2) FET-Stromquelle



Welchen Strom liefert die FET-Stromquelle

$$I_{DSS} = 12mA$$

$$U_p = -4V$$

$$R_S = 470\Omega$$

$$U_0 \geq -U_p = 4V$$

$$I_0 = I_{DSS}(1 - U_{GS}/U_p)^2$$

$$U_{GS} = -I_0 R_S$$

$$I_0/I_{DSS} = (1 + I_0 R_S/U_p)^2$$

$$0 = (R_S/U_p)^2 I_0^2 + (2R_S/U_p - 1/I_{DSS})I_0 + 1$$

$$0 = 13800mA^{-2} I_0^2 - 318mA^{-1} I_0 + 1$$

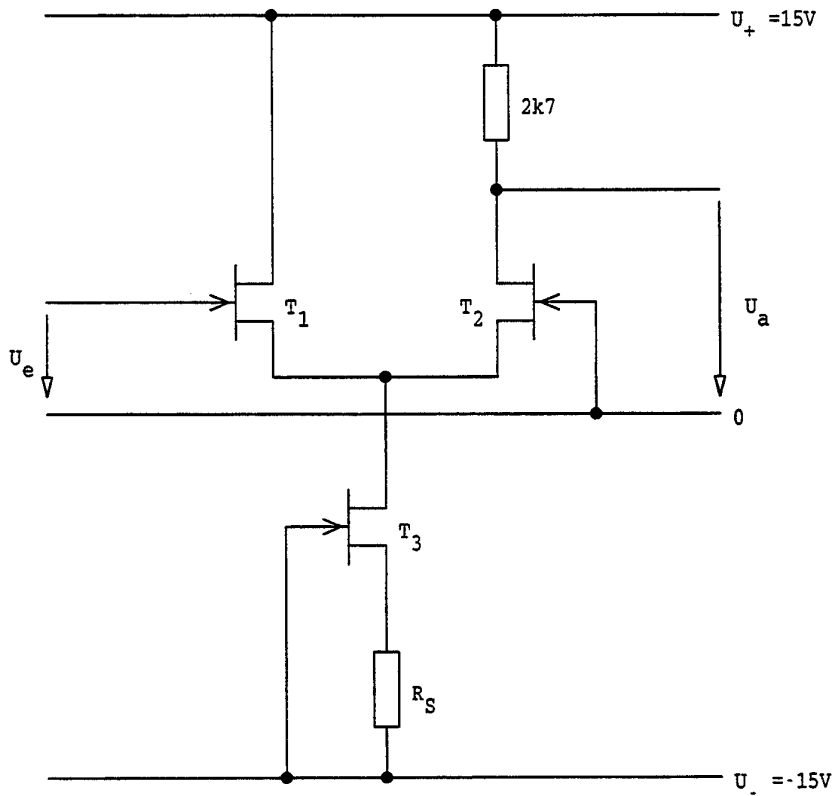
$$I_0 = \frac{318 - \sqrt{318^2 - 4 \cdot 13800}}{2 \cdot 13800} = 3.76mA$$

$$I_{02} = 19.3mA > I_{DSS} \dots \text{unphysikalische Lösung}$$

$$I_{DSS} = 8mA \quad U_p = -3V \Rightarrow I_0 = 2.69mA$$

$$I_{DSS} = 20mA \quad U_p = -5V \Rightarrow I_0 = 5.21mA$$

### 3) Differenzverstärker

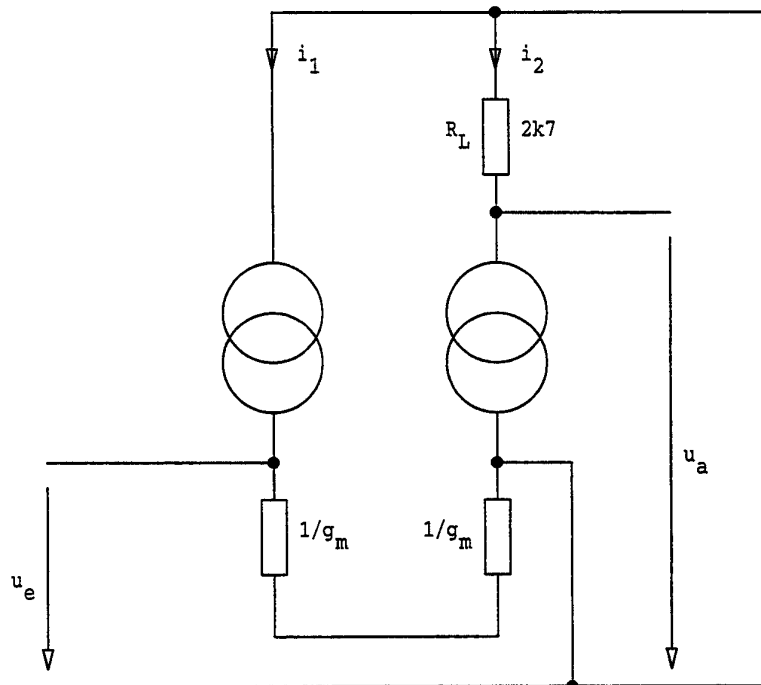


$$T_1, T_2, T_3: I_{DSS} = 15mA \quad U_p = -3.5V$$

Man stelle den Arbeitspunkt des gezeigten Differenzverstärkers so ein, daß sich eine Spannungsverstärkung von  $v_u = 5$  ergibt.

- Wie groß muß  $R_S$  gewählt werden?
- Wie groß ist  $U_{a0}$
- Wie groß muß  $U_+$  mindestens sein, damit der Arbeitspunkt von  $T_2$  im Stromquellenbereich liegt?

### Kleinsignalersatzschaltung



$$u_a = -i_2 R_L$$

$$u_e = i_1 / g_m - i_2 / g_m$$

$$i_1 = -i_2$$

$$v_u = \frac{u_a}{u_e} = \frac{-i_2 R_L}{-i_2 \cdot 2/g_m} = \frac{1}{2} g_m R_L$$

$$g_m = \frac{2v_u}{R_L} = \frac{2 \cdot 5}{2.7k\Omega} \quad g_m = 3.7 \frac{mA}{V}$$

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_p}\right)^2 \quad g_m = \frac{dI_D}{dU_{GS}} = \frac{2\sqrt{I_D I_{DSS}}}{-U_p}$$

$$I_D = \left(\frac{g_m U_p}{2}\right)^2 / I_{DSS} \quad I_D = 2.8mA$$

$$U_{GS3} = U_p \left(1 - \sqrt{\frac{I_{D3}}{I_{DSS3}}}\right) \quad I_{D3} = 2I_D \Rightarrow$$

$$U_{GS3} = -3.5V \left(1 - \sqrt{\frac{5.6mA}{15mA}}\right) = -1.36V$$

$$R_S = \frac{-U_{GS3}}{I_{D3}} = \frac{1.36V}{5.6mA} \Rightarrow R_S = 243\Omega$$

$$U_{a0} = U_+ - I_{D2} R_{D2}$$

$$U_{a0} = 15V - 2.8mA \cdot 2.7k\Omega$$

$$U_{a0} = 7.44V$$

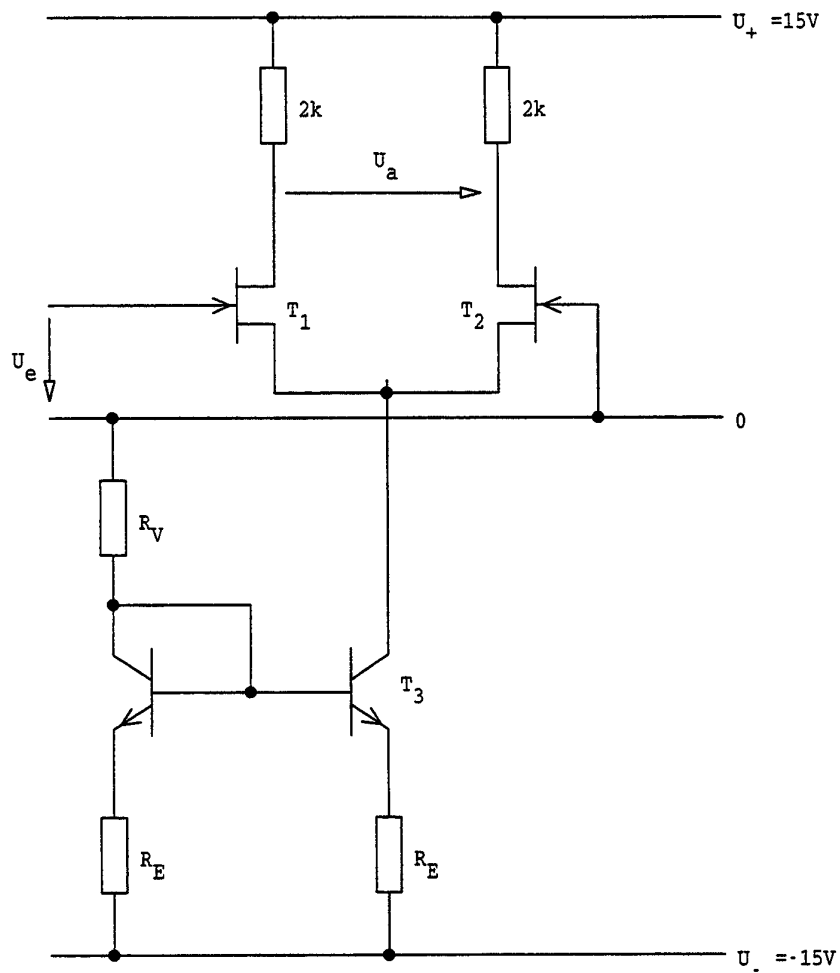
$$U_{GD} \leq U_p \quad \text{für Stromquellenbereich}$$

$$U_{DG} \geq -U_p = 3.5V = U_{DGmin}$$

$$U_{+min} = U_{DGmin} + I_{D2} R_{D2}$$

$$U_{+min} = 11.06V$$

4) Für den gezeigten Differenzverstärker dimensioniere man die Stromquelle und Bestimme die Spannungsverstärkung.



$$T_1, T_2 : I_{DSS} = 10mA$$

$$U_p = -2V$$

$$I_{C3} = 5mA$$

$$U_{CE3} = 5V$$

$$U_f = 0.6V$$

$$I_{C3} = 5mA \Rightarrow I_{D1} = I_{D2} = 2.5mA$$

$$U_{GS} = U_p \left( 1 - \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}} \right)$$

$$U_{GS} = -2 \left( 1 - \sqrt{\frac{2.5}{10}} \right) = -1V$$

$$U_{GS} + U_{CE3} + U_{RE} = -U_-$$

$$U_{RE} = -U_- - U_{CE3} - U_{GS}$$

$$U_{RE} = 15V - 5V + 1V$$

$$U_{RE} = 11V$$

$$U_{RE} = I_{C3}R_E \Rightarrow R_E = \frac{11V}{5mA}$$

$$R_E = 2.2k\Omega$$

$$-U_- = (R_V + R_E)I_{C3} + U_f$$

$$R_V + R_E = \frac{-U_- - U_f}{I_{C3}} = \frac{15V - 0.6V}{5mA}$$

$$R_V = 680\Omega$$

$$v_u = \frac{u_a}{u_e}$$

$$u_a = -i_{D1}R_D + i_{D2}R_D$$

$$u_e = i_{D1}/g_m - i_{D2}/g_m$$

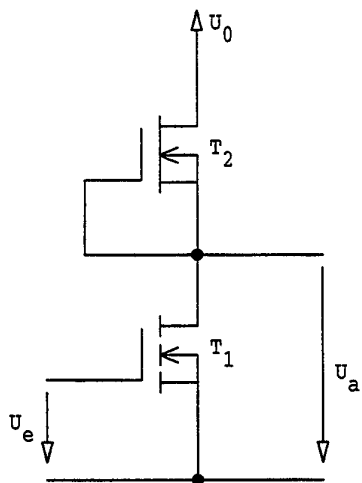
$$v_u = -g_m R_D$$

$$v_u = -\frac{2\sqrt{I_D I_{DSS}}}{-U_p} \cdot R_D$$

$$v_u = -\frac{2\sqrt{2.5mA \cdot 10mA}}{2V} \cdot 2k\Omega$$

$$v_u = -10$$

5) NMOS-Inverter mit integrierter Last.



Man ermittle die Übertragungskennlinie.

$$U_0 = 10V$$

$$U_{T1} = 2V$$

$$U_{T2} = -2V$$

$$\beta_1 = \beta_2$$

$$U_e < 2V \Rightarrow T_1 \text{ sperrt}$$

$T_1$  Stromquelle:

$$U_{DS1} \geq U_{GS1} - U_{T1} \Rightarrow U_a \geq U_e - 2V$$

$T_2$  Ohmscher Bereich:

$$U_{DG2} < -U_{T2} \Rightarrow U_0 - U_a < 2V \Rightarrow U_a > 8V$$

$$I_{D1} = \frac{\beta}{2}(U_{GS1} - U_{T1})^2$$

$$I_{D2} = \beta((U_{GS2} - U_{T2})U_{DS2} - \frac{1}{2}U_{DS2}^2)$$

$$(U_e - U_{T1})^2 = -2U_{T2}(U_0 - U_a) - (U_0 - U_a)^2$$

$$U_e = \sqrt{4V(10V - U_a) - (10V - U_a)^2} + 2V$$

$T_1$  Stromquelle:

$$U_a \geq U_e - 2V$$

$T_2$  Stromquelle:

$$U_a \leq 8V$$

$$\frac{\beta}{2}(U_{GS1} - U_{T1})^2 = \frac{\beta}{2}(U_{GS2} - U_{T2})^2$$

$$U_{GS1} - U_{T1} = U_{GS2} - U_{T2}$$

$$U_e - 2V = 0V + 2V$$

$$U_e = 4V$$

$T_1$  Ohmscher Bereich:

$$U_a < U_e - 2V$$

$T_2$  Stromquelle:

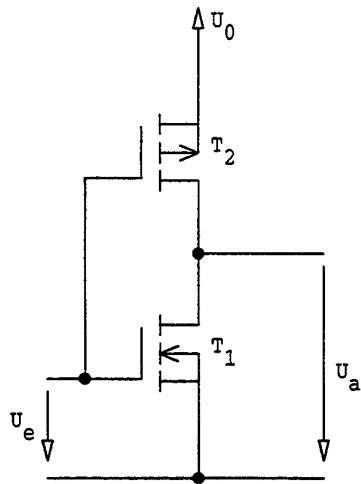
$$U_a \leq 8V$$

$$\beta((U_{GS1} - U_{T1})U_{DS1} - \frac{1}{2}U_{DS1}^2) = \frac{\beta}{2}(U_{GS2} - U_{T2})^2$$

$$((U_e - U_{T1})U_a - \frac{1}{2}U_a^2) = \frac{1}{2}4V^2$$

$$U_e = \frac{2V^2}{U_a} + \frac{U_a}{2} + 2V$$

### 6) CMOS-Inverter



Man ermittle die Übertragungskennlinie.

$$U_0 = 6V$$

$$U_{T1} = 1V \quad (\text{Bauelementstreuung } \pm 0.5V)$$

$$\bar{U}_{T2} = 2V \quad (\text{Bauelementstreuung } \pm 1V)$$

$$\beta_R = \frac{\beta_1}{\beta_2} = 1$$

Beide Transistoren im Stromquellenbereich

$$\frac{\beta}{2}(U_{GS1} - U_{T1})^2 = \frac{\beta}{2}(U_{SG2} - \bar{U}_{T2})^2$$

$$U_e - U_{T1} = U_0 - U_e - \bar{U}_{T2}$$

$$U_e = \frac{1}{2}(U_0 + U_{T1} - \bar{U}_{T2})$$

$$U_e = \frac{1}{2}(6V + 1V - 2V)$$

$$U_e = 2.5V \quad (\text{Streuung } \pm 0.75V)$$

Grenze für  $T_1$

$$U_{DS1} \geq U_{GS1} - U_{T1}$$

$$U_a \geq U_e - U_{T1}$$

$$U_a \geq 1.5V \quad (\text{Streuung} \pm 0.5V)$$

Grenze für  $T_2$

$$U_{SD2} \geq U_{SG2} - \bar{U}_{T2}$$

$$U_0 - U_a \geq U_0 - U_e - \bar{U}_{T2}$$

$$U_a \leq U_e + \bar{U}_{T2}$$

$$U_a \leq 4.5V \quad (\text{Streuung} \pm 1V)$$

$T_1$  Stromquelle,  $T_2$  Ohmscher Bereich:

$$U_{T1} < U_e < 2.5V$$

$$\frac{\beta}{2}(U_{GS1} - U_{T1})^2 = \beta((U_{SG2} - \bar{U}_{T2})U_{SD2} - \frac{1}{2}U_{SD2}^2)$$

$$\frac{1}{2}(U_e - U_{T1})^2 = (U_0 - U_e - \bar{U}_{T2})(U_0 - U_a) - \frac{1}{2}(U_0 - U_a)^2$$

$$U_a = U_e + \bar{U}_{T2} + \sqrt{(U_0 - U_e - \bar{U}_{T2})^2 - (U_e - U_{T1})^2}$$

$T_1$  Ohmscher Bereich,  $T_2$  Stromquelle:

$$2.5V < U_e < U_0 - \bar{U}_{T2}$$

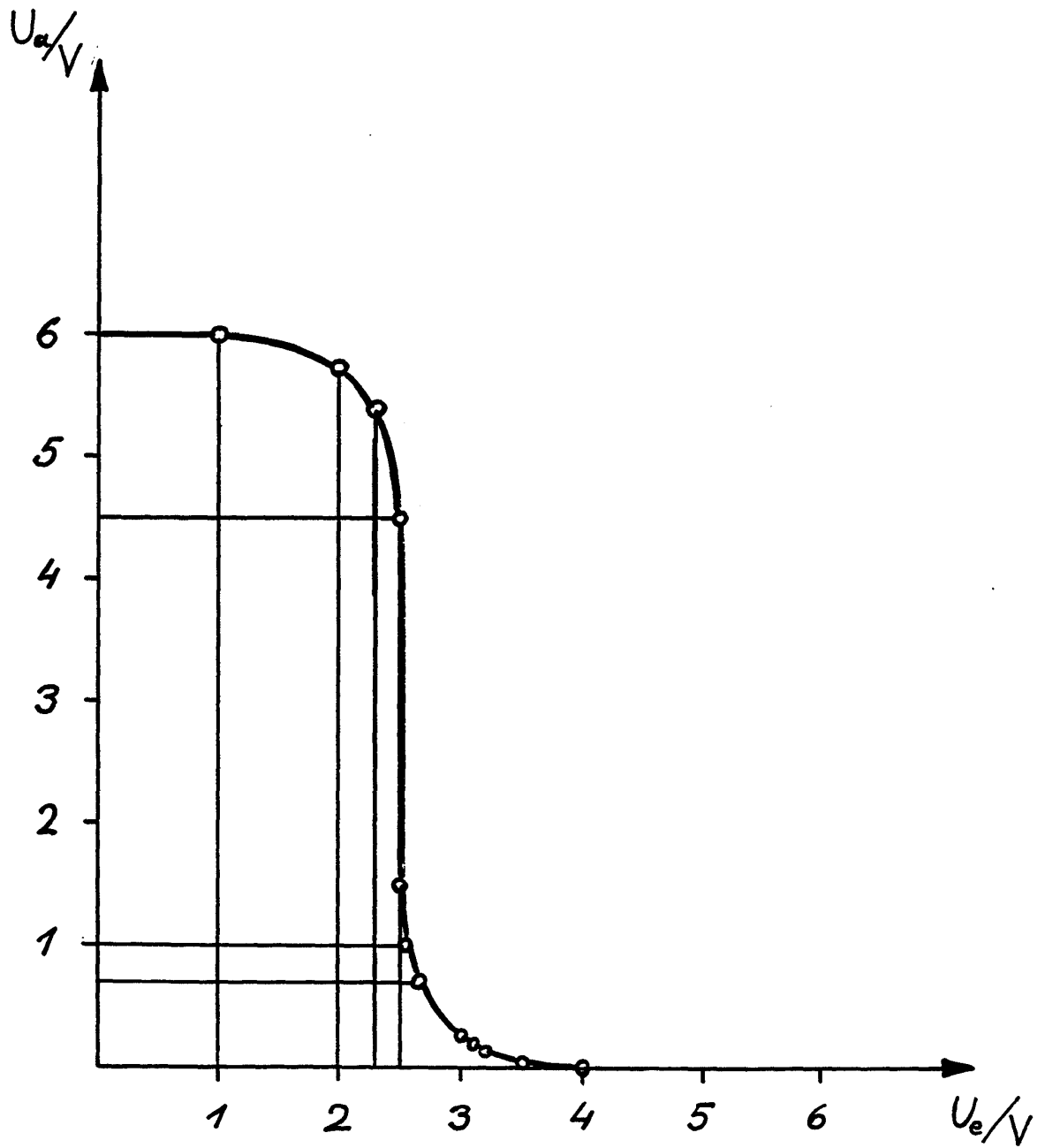
$$2.5V < U_e < 4V$$

$$\beta((U_{GS1} - U_{T1})U_{DS1} - \frac{1}{2}U_{DS1}^2) = \frac{\beta}{2}(U_{SG2} - \bar{U}_{T2})^2$$

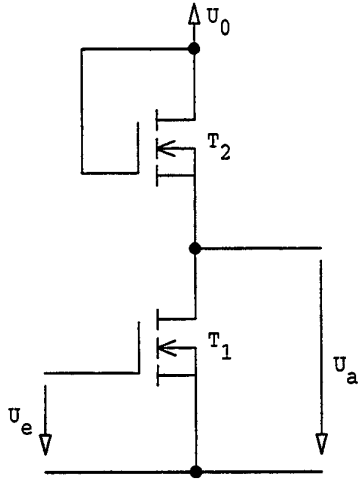
$$(U_e - U_{T1})U_a - \frac{1}{2}U_a^2 = \frac{1}{2}(U_0 - U_e - \bar{U}_{T2})^2$$

$$U_a = U_e - U_{T1} - \sqrt{(U_e - U_{T1})^2 - (U_0 - U_e - \bar{U}_{T2})^2}$$

# CMOS-INVERTER



7) Man ermittle die Übertragungskennlinie des gezeigten NMOS-Inverters.



$$U_0 = 10V$$

$$U_{T1} = U_{T2} = 2V$$

$$\beta_1 = 1mA/V^2$$

$$\beta_2 = 0.2mA/V^2$$

$$U_{GD2} = 0V$$

$$U_{GD2} \leq U_{T2} = 2V$$

$T_2$  immer im Stromquellenbereich

$$I_{D2} = \frac{\beta_2}{2}(U_{GS2} - U_{T2})^2 = \frac{\beta_2}{2}(U_0 - U_a - U_{T2})^2$$

$T_1$  sperrt

$$U_e \leq U_{T1}$$

$$I_{D1} = I_{D2} = 0$$

$$U_0 - U_a - U_{T2} = 0$$

$$U_a = U_0 - U_{T2}$$

$$U_a = 8V$$

$T_1$  Stromquelle

$$\frac{\beta_1}{2}(U_e - U_{T1})^2 = \frac{\beta_2}{2}(U_0 - U_a - U_{T2})^2$$

$$\sqrt{\frac{\beta_1}{\beta_2}}(U_e - U_{T1}) = U_0 - U_a - U_{T2}$$

$$U_a = U_0 - U_{T2} - \sqrt{\frac{\beta_1}{\beta_2}}(U_e - U_{T1})$$

Gültigkeitsbereich

$$U_{DS1} \geq U_{GS1} - U_{T1}$$

$$U_a \geq U_e - U_{T1}$$

$$U_e = \frac{U_0 + \sqrt{\frac{\beta_1}{\beta_2}}U_T}{1 + \sqrt{\frac{\beta_1}{\beta_2}}} = \frac{10V + \sqrt{5} \cdot 2V}{1 + \sqrt{5}} = 4.47V$$

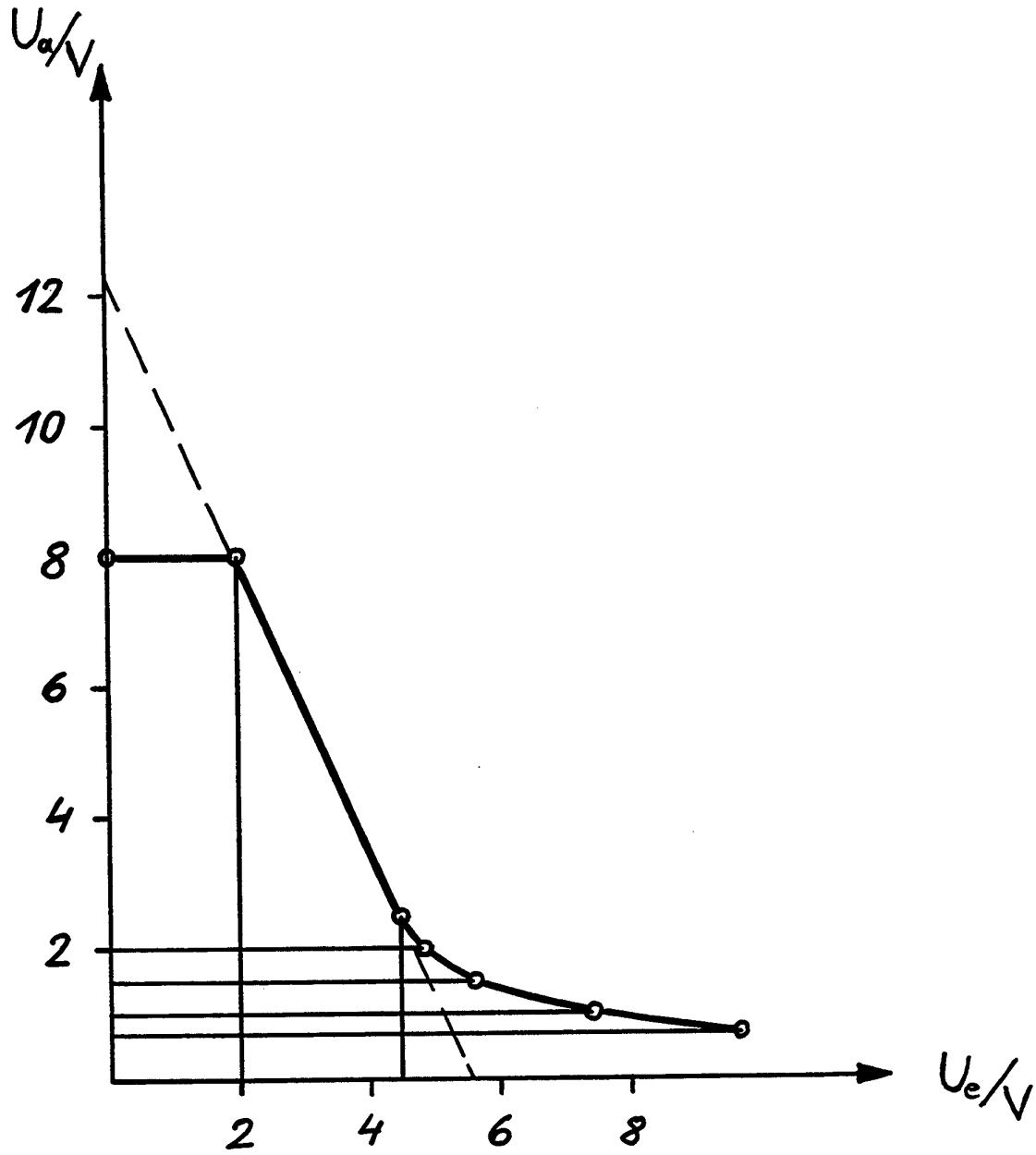
$T_1$  im ohmschen Bereich

$$U_e \geq 4.47V$$

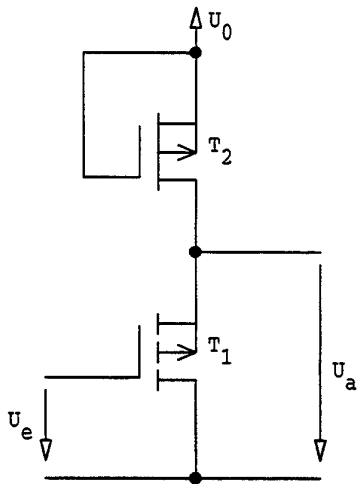
$$\beta_1((U_e - U_{T1})U_a - \frac{1}{2}U_a^2) = \frac{\beta_2}{2}(U_0 - U_a - U_{T2})^2$$

$$U_e = U_{T1} + \frac{\beta_2}{2\beta_1 U_a}(U_0 - U_a - U_{T2})^2 + \frac{1}{2}U_a$$

# NMOS-INVERTER



### 8) PMOS-Source-Folger



gesucht:

- Übertragungskennlinie
- Querstrom
- Aussteuergrenzen

$$U_0 = 10V$$

$$\bar{U}_{T1} = 2V$$

$$\bar{U}_{T2} = -2V$$

$$\beta_1 = 0.25mA/V^2$$

$$\beta_2 = 1.0mA/V^2$$

Grenzen für Stromquellenbereich

$$U_{SD} \geq U_{SG} - \bar{U}_T$$

$$T1: U_a \geq U_e - U_e - 2V$$

$$U_e \geq -2V$$

$$T2: U_0 - U_a \geq 0V + 2V$$

$$U_a \leq 8V$$

$T_1$  immer Stromquelle

$$I_{D1} = \frac{\beta_1}{2}(U_a - U_e - 2V)^2$$

$T_2$  Stromquelle

$$I_{D2} = \frac{\beta_2}{2}(0V + 2V)^2$$

$$\sqrt{\frac{\beta_1}{\beta_2}}(U_a - U_e - 2V) = 2V$$

$$U_a = 2V\sqrt{\frac{\beta_2}{\beta_1}} + U_e + 2V$$

$$U_a = U_e + 6V$$

$T_2$  ohmscher Bereich

$$U_a \geq 8V$$

$$I_{D2} = \beta_2(2(U_0 - U_a) - \frac{1}{2}(U_0 - U_a)^2)$$

$$(U_a - U_e - 2V) = \sqrt{\frac{2\beta_2}{\beta_1}}\sqrt{2(U_0 - U_a) - \frac{1}{2}(U_0 - U_a)^2}$$

$$U_e = U_a - 2V - \sqrt{8}\sqrt{2(10V - U_a) - \frac{1}{2}(10V - U_a)^2}$$

$T_1$  sperrt

$$U_e \geq 8V \Rightarrow U_a = 10V$$

$$U_a - U_e = U_{SG1} \leq \bar{U}_{T1} = 2V$$

Querstrom:  $U_e$ ,  $U_a$  einsetzen:

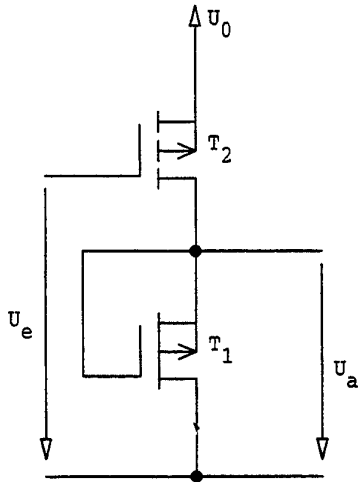
$$I_{D1} = \frac{\beta_1}{2}(U_a - U_e - 2V)^2$$

Aussteuergrenzen:

$$U_e = 0V \Rightarrow U_a = 6V$$

$$U_e = 10V \Rightarrow U_a = 10V$$

9) PMOS-Inverter mit Integrierter Last



$$U_0 = 10V$$

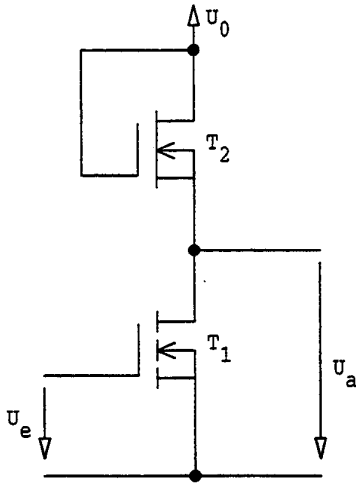
$$\bar{U}_{T1} = -2V$$

$$\bar{U}_{T2} = 2V$$

$$\beta_1 = \beta_2$$

Bestimmen Sie die Übertragungskennlinie

10) Man ermittle die Übertragungskennlinie  $U_a(U_e)$  des gezeigten NMOS-Inverters.



$$U_0 = 5V$$

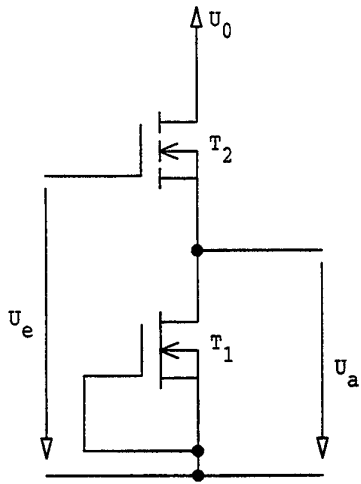
$$U_{T1} = 1V$$

$$U_{T2} = -1V$$

$$\beta_1 = 1mA/V^2$$

$$\beta_2 = 0.2mA/V^2$$

### 11) NMOS-Source-Folger



gesucht:

- Übertragungskennlinie
- Querstrom
- Aussteuergrenzen

$$U_0 = 10V$$

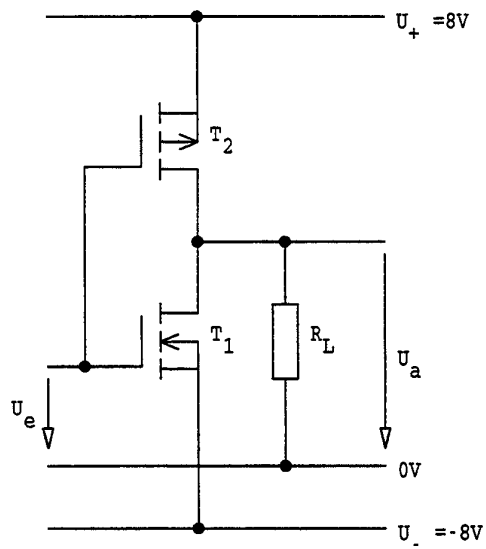
$$U_{T1} = -2V$$

$$U_{T2} = 2V$$

$$\beta_1 = 0.25mA/V^2$$

$$\beta_2 = 1.0mA/V^2$$

12) Wie groß ist die Spannungsverstärkung des gezeigten CMOS-Inverters ( $v_u = -120$ )



$$U_{TP} = -2V$$

$$U_{TN} = 2V$$

$$\beta_P = 0.1mA/V^2$$

$$\beta_N = 0.1mA/V^2$$

$$R_L = 100k\Omega$$

13)

a) Berechnen Sie die Eingangsspannung  $U_1$ , für die  $T_1$  in der Schaltung (a) gerade an der Grenze zwischen Ohmschen Bereich und Stromquellenbereich arbeitet (2V). Berechnen Sie den zugehörigen Drainstrom  $I_D$  (1mA) und die Spannungsverstärkung  $v_u$  (-10).

b) Ersetzen Sie  $T_2$  durch einen ohmschen Widerstand  $R_L$  (Schaltung (b)) so, daß der oben berechnete Arbeitspunkt und die Spannungsverstärkung ungeändert bleiben. Wie groß ist  $R_L$ ? (5k)

Wie groß ist die dafür erforderliche neue Betriebsspannung  $U_0$ ? (6V)

$$U_0 = 12V$$

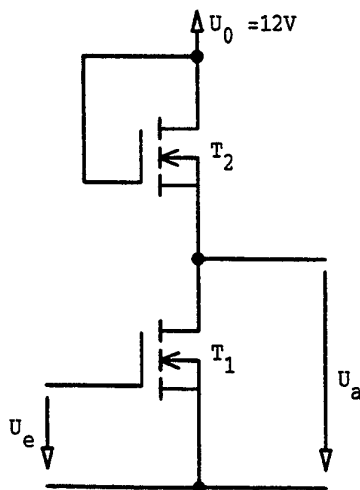
$$U_{T1} = 1V$$

$$U_{T2} = 1V$$

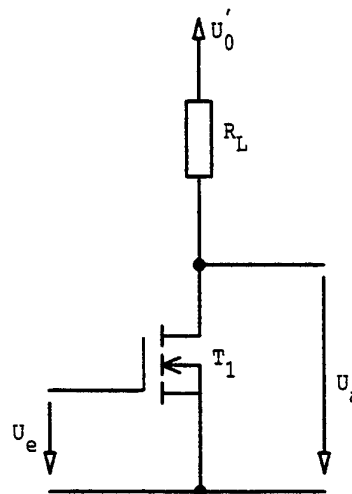
$$\beta_1 = 2.0mA/V^2$$

$$\beta_2 = 20\mu A/V^2$$

Schaltung a:



Schaltung b:



## Operationsverstärker

### 1) Idealer OPV mit invertierender Beschaltung

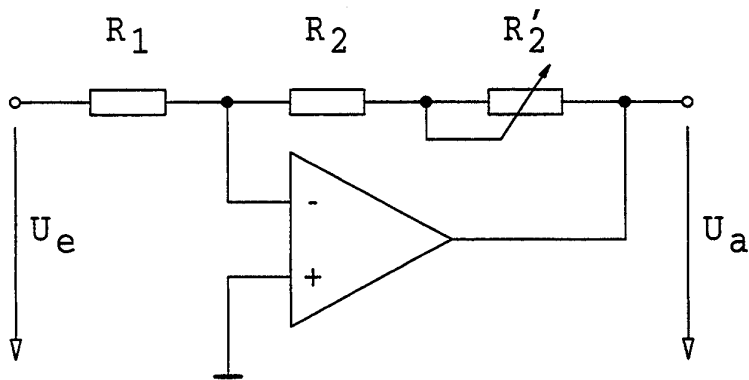
In welchem Bereich kann die Verstärkung des angegebenen Verstärkers variiert werden? (Verstärker ideal)

$$R_1 = 1k\Omega$$

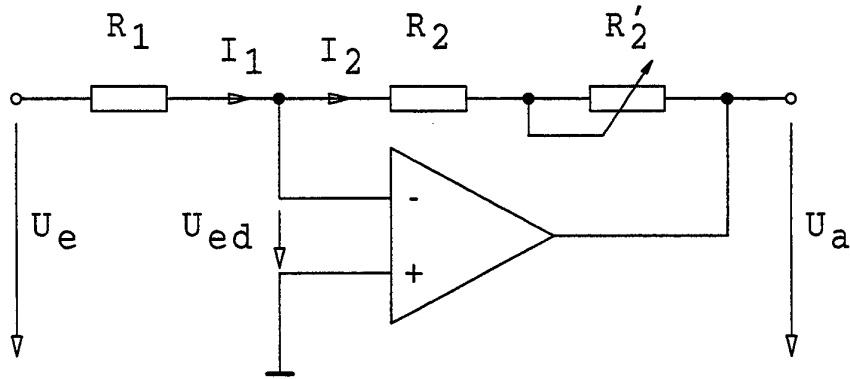
$$R_2 = 8.2k\Omega$$

$$R'_2 \in (0 \dots 2.5k\Omega)$$

$$v_{r\infty} = ?$$



idealer OPV:  $U_{ed} = 0$



$$U_+ = 0 \Rightarrow U_- = 0$$

$$I_1 = U_e / R_1$$

Eingangsstrom=0:  $\Rightarrow I_2 = I_1$

$$U_a = -I_2(R_2 + R'_2) = -\frac{U_e}{R_1}(R_2 + R'_2)$$

$$v_{r\infty} = \frac{U_a}{U_e} = -\frac{R_2 + R'_2}{R_1}$$

$$R'_2 = 0\Omega : v_{r\infty} = -8.2$$

$$R'_2 = 2.5k\Omega : v_{r\infty} = -10.7$$

## 2) Summierverstärker

Verschiebung der Ausgangsspannung durch eine Addierschaltung. (Verstärker ideal)

$$U_e \in (-2V \dots +2V)$$

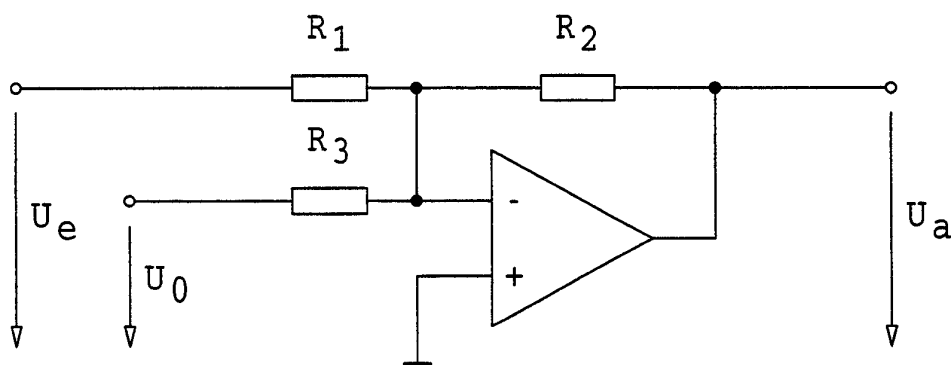
$$R_1 = 1k\Omega$$

$$U_a \in (10V \dots 0V)$$

$$U_0 = -10V$$

$$R_2 = ?$$

$$R_3 = ?$$



ohne  $U_0$  ( $U_0 = 0$ ):

Verstärkung so wählen, daß  $U_a \in (+5V \dots -5V)$

$$-v_{r\infty} = -\frac{U_a}{U_e} = \frac{5V}{2V} = 2.5 = \frac{R_2}{R_1} \Rightarrow R_2 = 2.5k\Omega$$

Mit  $U_0$  Verschiebung des Ausgangsspannungsbereiches auf  $0V \dots 10V$ .  $\Rightarrow$  Verschiebung um  $+5V$ .

$$\frac{U_a}{U_0} = -\frac{R_2}{R_3} = \frac{5V}{-10V} \Rightarrow R_3 = 5k\Omega$$

Andere Möglichkeit: Superposition

$$U_{a1} = U_a \Big|_{U_0=0} = -U_e \frac{R_2}{R_1} \quad U_{a2} = U_a \Big|_{U_e=0} = -U_0 \frac{R_2}{R_3}$$

$$U_a = U_{a1} + U_{a2} = -U_e \frac{R_2}{R_1} - U_0 \frac{R_2}{R_3}$$

$$U_a \Big|_{U_e=+2V} = -2V \frac{R_2}{R_1} + 10V \frac{R_2}{R_3} = 0V$$

$$U_a \Big|_{U_e=-2V} = 2V \frac{R_2}{R_1} + 10V \frac{R_2}{R_3} = 10V$$

### 3) Idealer OPV mit invertierender Beschaltung

Verschiebung der Ausgangsspannung mit einer Spannungsquelle. (Verstärker ideal)

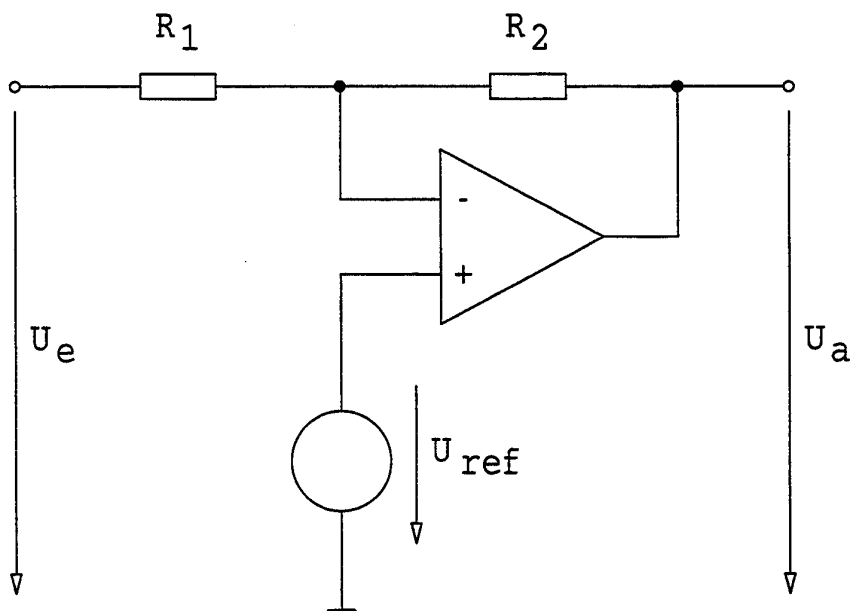
$$R_1 = 1k\Omega$$

$$U_e \in (-2V \dots +2V)$$

$$U_a \in (10V \dots 0V)$$

$$R_2 = ?$$

$$U_{ref} = ?$$

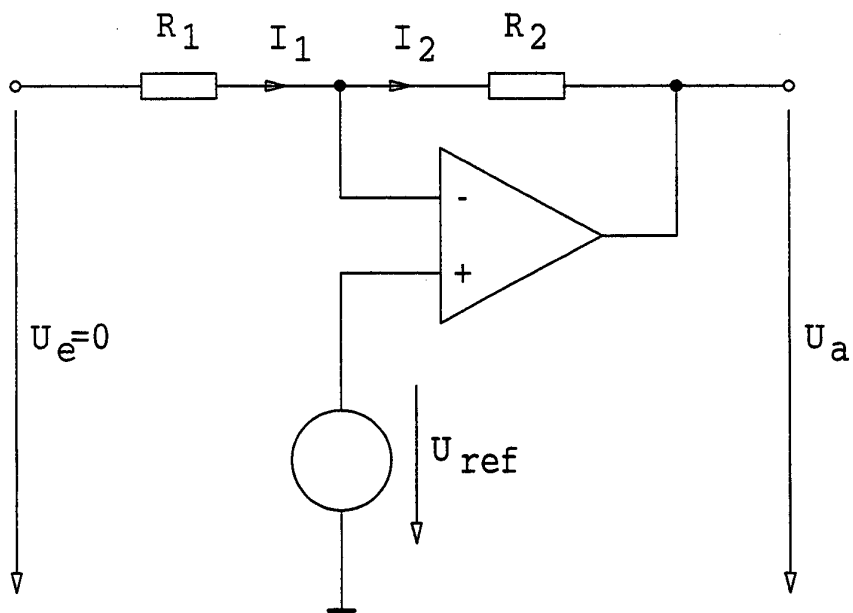


Ähnlich wie Bsp.2

Mit  $U_{ref} = 0$   $R_2$  so dimensionieren, daß  $U_a \in (+5V \dots -5V)$

$$U_a = -U_e \frac{R_2}{R_1} \Rightarrow R_2 = -\frac{U_a}{U_e} R_1 = 2.5k\Omega$$

Verschieben des Ausgangsspannungsbereiches um 5V



$$I_1 = \frac{U_e - U_{ref}}{R_1} = I_2 = \frac{U_{ref} - U_a}{R_2}$$

$$U_e = 0V \Rightarrow U_a = 5V$$

$$\frac{-U_{ref}}{R_1} = \frac{U_{ref} - 5V}{R_2}$$

$$U_{ref} = 5V \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) = 1.43V$$

oder wieder mit Superposition.

#### 4) Idealer OPV mit Elektrometer-Beschaltung

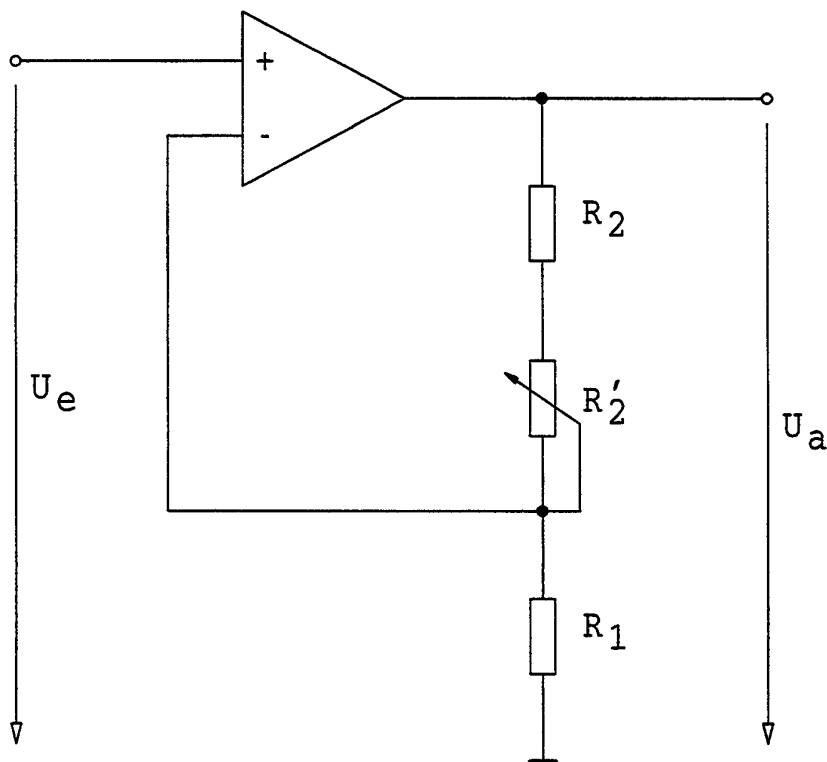
In welchem Bereich kann die Verstärkung des angegebenen Verstärkers variiert werden? (Verstärker ideal)

$$R_1 = 1k\Omega$$

$$R_2 = 8.2k\Omega$$

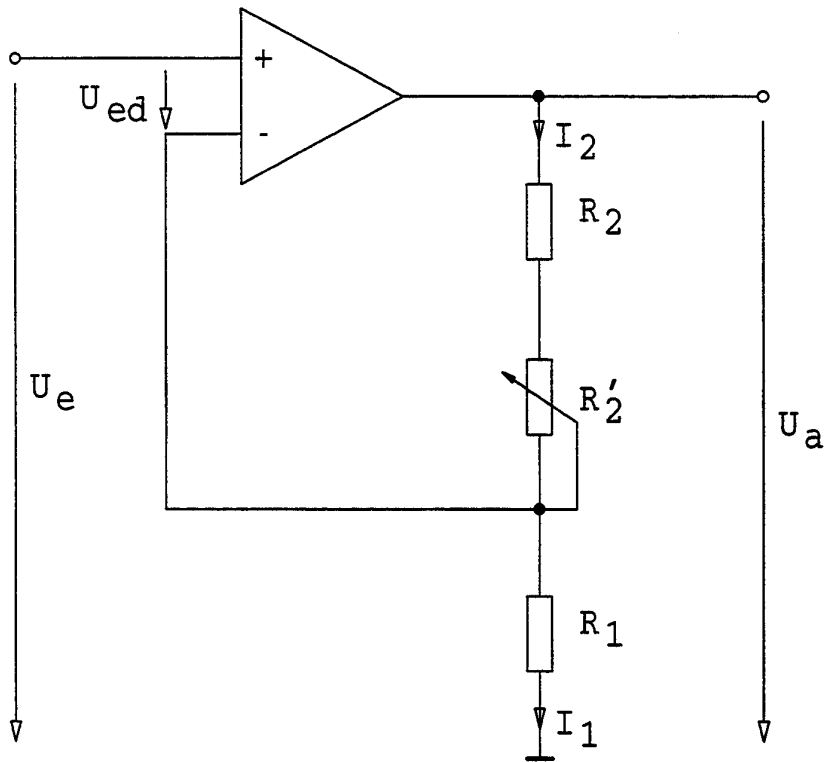
$$R'_2 \in (0\Omega \dots 2.5k\Omega)$$

$$v_{r\infty} = ?$$



Ähnlich Bsp. 1

idealer OPV:  $\Rightarrow U_{ed} = 0V$



$$U_{R1} = U_e \Rightarrow I_1 = \frac{U_e}{R_1}$$

$$I_1 = I_2 = \frac{U_a - U_e}{R_2 + R'_2}$$

$$\frac{U_a - U_e}{R_2 + R'_2} = \frac{U_e}{R_1} \Rightarrow \frac{U_a}{U_e} = v_{r\infty} = 1 + \frac{R_2 + R'_2}{R_1}$$

$$v_{r\infty} \Big|_{R'_2=0\Omega} = 9.2 \quad v_{r\infty} \Big|_{R'_2=2.5k\Omega} = 11.7$$

### 5) Idealer OPV mit Elektrometer-Beschaltung

Verschiebung der Ausgangsspannung mit einer Spannungsquelle. (Verstärker ideal)

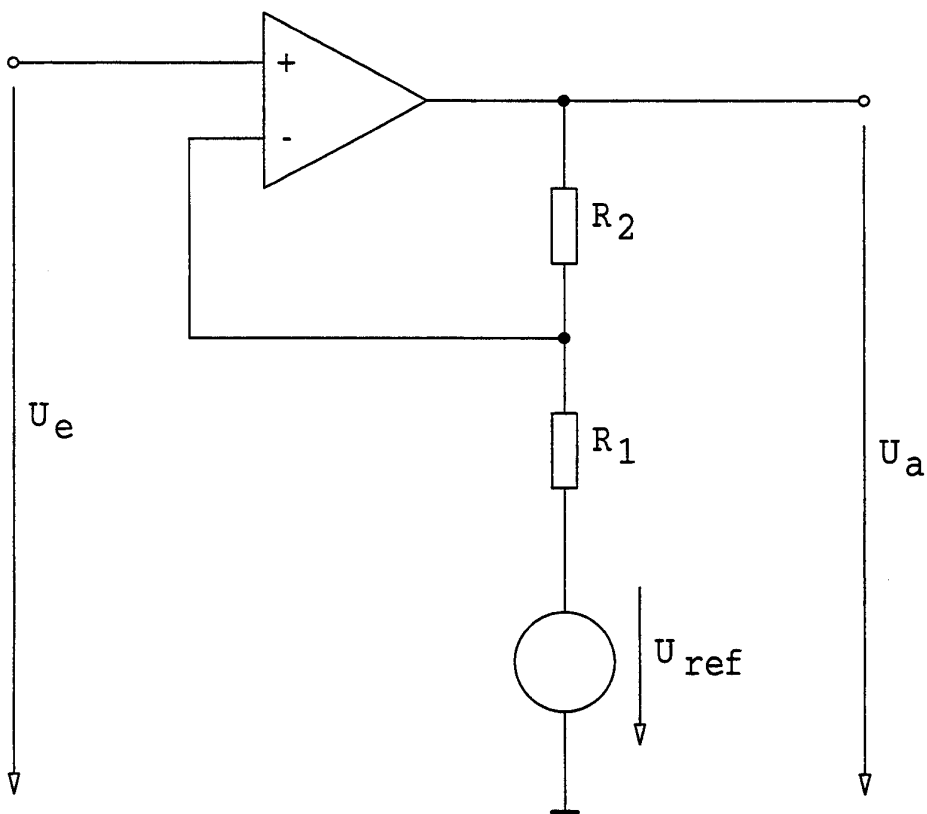
$$R_1 = 1k\Omega$$

$$U_e \in (-2V \dots +2V)$$

$$U_a \in (0V \dots 10V)$$

$$R_2 = ?$$

$$U_{ref} = ?$$



$$\frac{U_e - U_{ref}}{R_1} = \frac{U_a - U_{ref}}{R_1 + R_2}$$

$$\frac{U_a - U_{ref}}{U_e - U_{ref}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1/\beta$$

$$U_a - (1/\beta)U_e = U_{ref}(1 - 1/\beta)$$

linearer Zusammenhang zwischen  $U_e$  und  $U_{ref} \Rightarrow$

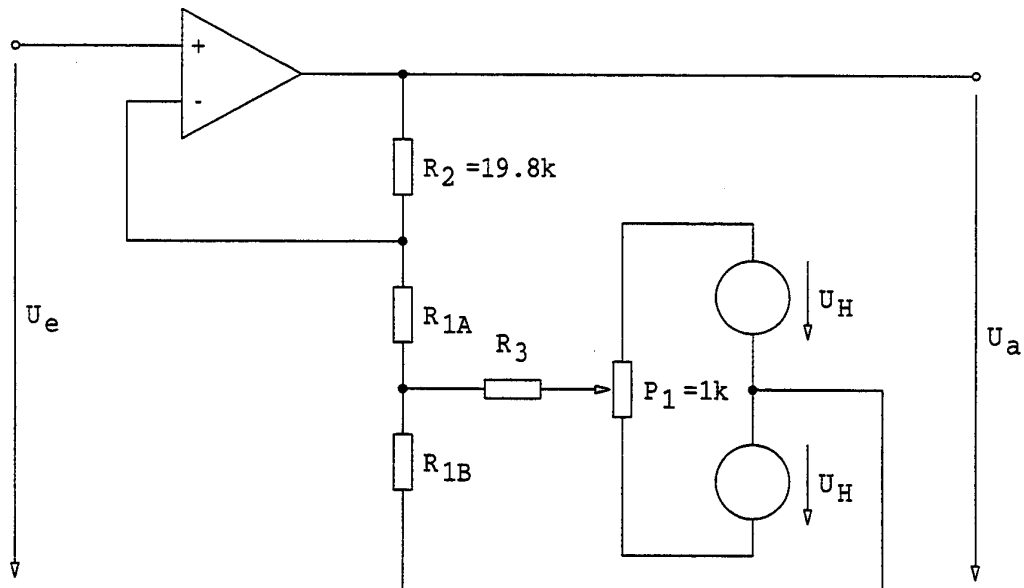
$$U_e = 0V \quad U_a = 5V \quad 5V = U_{ref}(1 - 1/\beta)$$

$$U_e = 2V \quad U_a = 10V \quad 10V - (1/\beta)2V = U_{ref}(1 - 1/\beta) = 5V$$

$$1/\beta = 5/2 \quad 1 + R_2/R_1 = 5/2 \quad \Rightarrow \quad R_2 = 1.5k\Omega$$

$$U_{ref}(1 - 5/2) = 5V \quad \Rightarrow \quad U_{ref} = -\frac{10}{3}V$$

6) Elektrometer-Verstärker mit Offsetspannungskorrektur



OPV:  $R_{1B} = 100\Omega$ . Für den Punkt a) ist der OPV als ideal anzunehmen. Für die Punkte b) und c) ist der OPV ideal mit Ausnahme einer Offsetspannung im Bereich  $-5mV$  bis  $+5mV$ .

a) Man berechne  $R_{1A}$  für eine Verstärkung von 100. (Ohne Berücksichtigung des Netzwerkes zur Offsetkorrektur)

b) Wie groß muß  $R_3$  mindestens sein, damit der Verstärkungsfehler, der durch das Netzwerk zur Offsetspannungskorrektur verursacht wird, im ungünstigsten Fall unter 0.1% bleibt?

c) Wie groß muß  $U_H$  mindestens sein, damit ein möglicher Offsetfehler des OPV sicher korrigiert werden kann?

a)

$$\frac{U_a}{U_e} = 1 + \frac{R_2}{R_{1A} + R_{1B}} \Rightarrow$$

$$R_{1A} = \left( \left( \frac{U_a}{U_e} - 1 \right) \frac{1}{R_2} \right)^{-1} - R_{1B} = 100\Omega$$

b)

$$v = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

0.1% Fehler: neue Verstärkung  $v' = v + 0.001v = 1.001v$  (Geringster Widerstand des Potentiometers, wenn es am oberen oder unteren Anschlag ist:  $0\Omega$ )

$$v = 100 \Rightarrow v' = 100.1$$

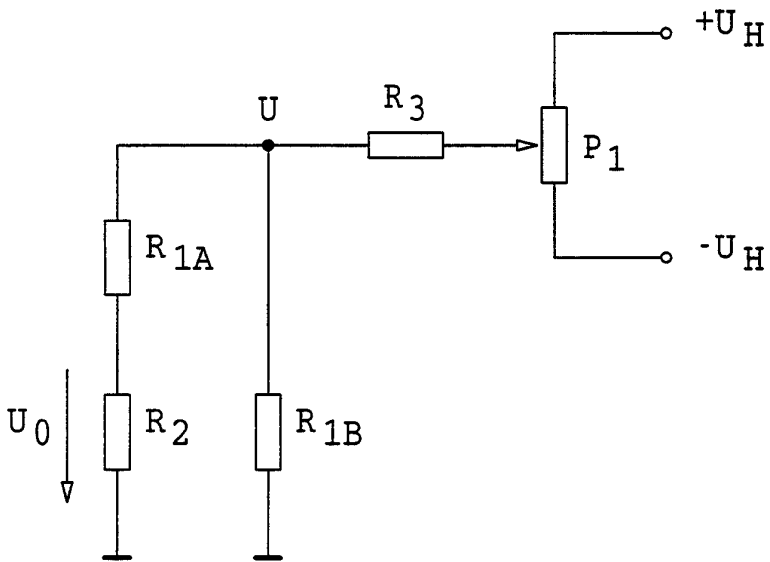
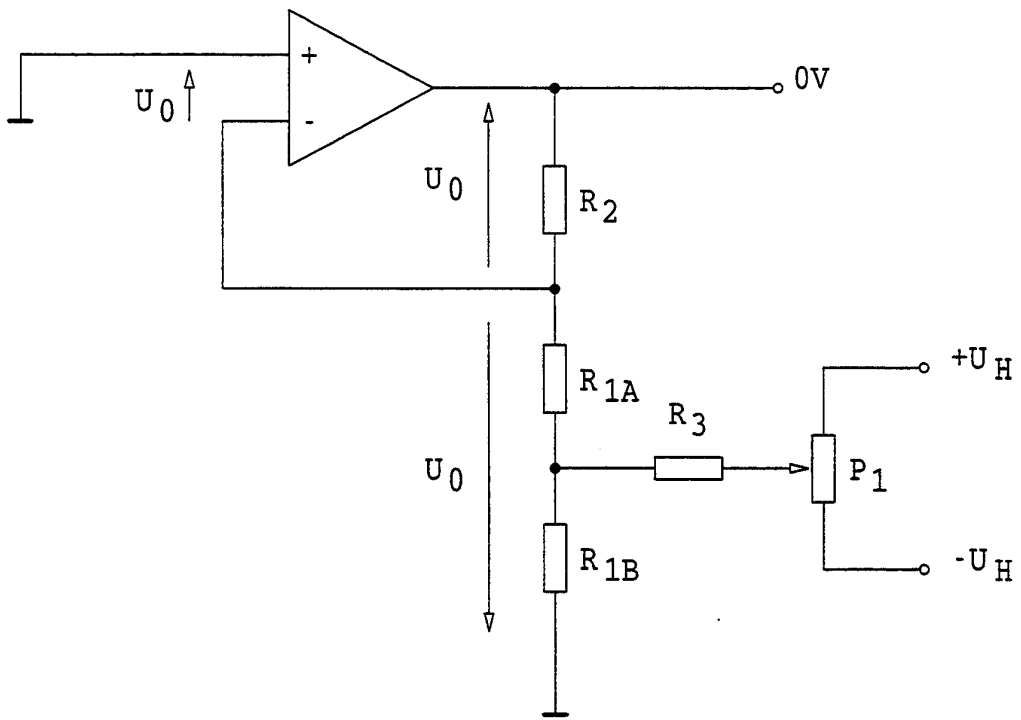
$$v' = 1 + \frac{R_2}{R'_1} \Rightarrow R'_1 = 199.79818\Omega$$

$$R'_1 = R_{1A} + R_{1B} || R_3 \Rightarrow R_3 = 49.5k\Omega$$

c)

Offsetkorrektur im Bereich  $\pm 5mV$

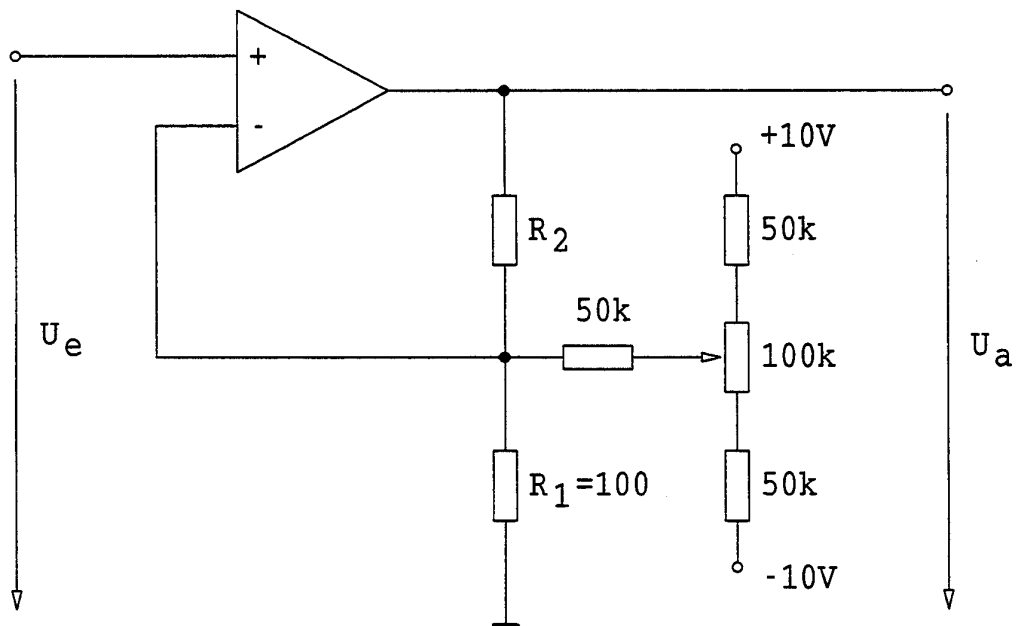
$$U_e = 0V \quad U_a = 0V$$



$$\frac{U}{U_0} = \frac{R_{1A} + R_2}{R_2} \Rightarrow U = 5.0255mV$$

$$\frac{U}{U_H} = \frac{(R_{1A} + R_2) || R_{1B}}{(R_{1A} + R_2) || R_{1B} + R_3} \Rightarrow U_H = 2.53V$$

7) Elektrometer-Verstärker mit Offsetspannungskorrektur



OPV: Für den Punkt a) ist der OPV als ideal anzunehmen. Für die Punkte b) und c) ist der OPV ideal mit Ausnahme einer Offsetspannung.

a) Man berechne  $R_2$  für eine Verstärkung von 100. (Ohne Berücksichtigung des Netzwerkes zur Offsetkorrektur)

b) Wie groß ist der maximale Verstärkungsfehler, der durch das Netzwerk zur Offsetspannungskorrektur verursacht wird?

c) Welcher Offsetfehlerbereich des OPV kann korrigiert werden?

a)

$$v = 1 + \frac{R_2}{R_1} \Rightarrow R_2 = R_1(v - 1) = 9.9k\Omega$$

b)

Maximaler Fehler, wenn Potentiometer am oberen oder unteren Anschlag.

$$R'_1 = R_1 \parallel (50k\Omega + (50k\Omega \parallel 150k\Omega)) = 99.886\Omega$$

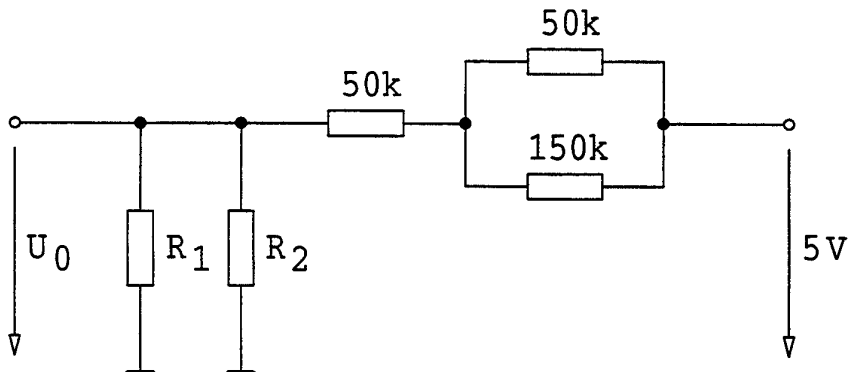
$$v' = 1 + \frac{R_2}{R'_1} = 100.113 \quad F = \frac{v' - v}{v} = 0.113\%$$

c)

Offsetnetzwerk in Ersatzquelle umrechnen (oberer Anschlag):

$$R_i = 50k\Omega + (50k\Omega \parallel 150k\Omega) = 87.5k\Omega$$

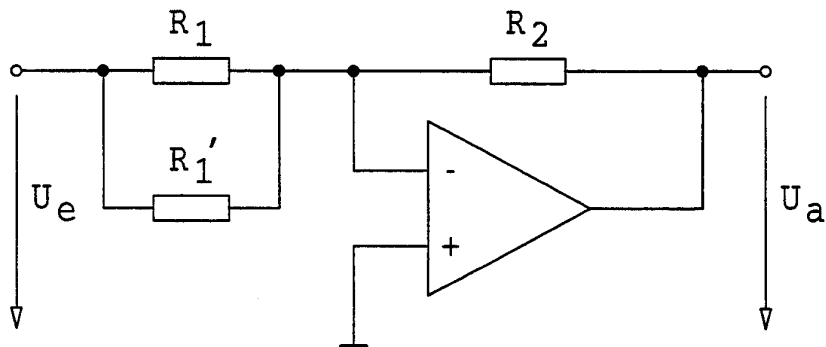
$$U_{LL} = \frac{150k\Omega}{50k\Omega + 150k\Omega} (10V - (-10V)) - 10V = 5V$$



$$U_0 = \frac{R_1 \parallel R_2}{R_1 \parallel R_2 + R_i} 5V = 5.65mV$$

$$U_0 \in (-5.65mV \dots + 5.65mV)$$

8) Operationsverstärker mit invertierender Beschaltung



- a) Gesucht  $R_1$  damit Verstärkung  $v_{r\infty} = -15$  (idealer OPV), wenn  $R_2 = 18k\Omega$  ( $R_1' = \infty$ ).
- b) Wie groß ist der Fehler der Verstärkung bei einem nichtidealen OPV mit:

$$R_1 = 1k\Omega$$

$$R_1' = \infty$$

$$R_2 = 15k\Omega$$

$$v_g = 1000$$

$$r_{ag} = 50\Omega$$

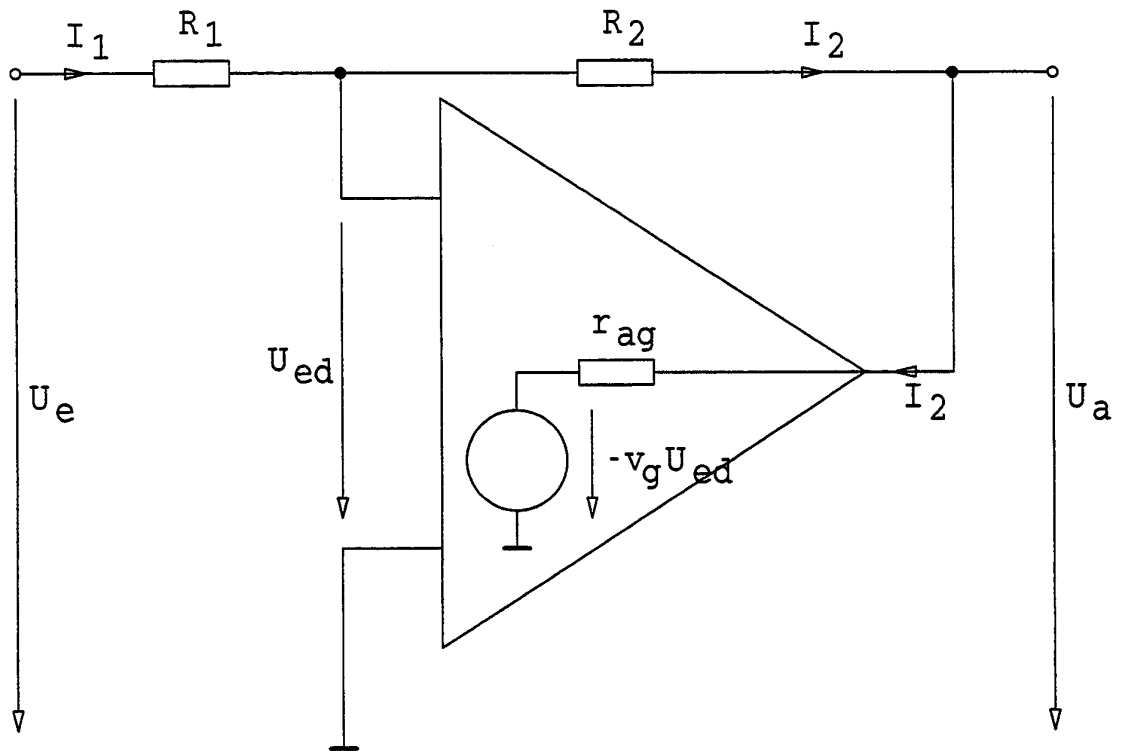
gegenüber einem idealen OPV.

- c) Wie groß muß der Widerstand  $R_1'$  parallel zu  $R_1$  sein, damit dieser Fehler verschwindet?

a)

$$v_{r\infty} = -15 = \frac{U_a}{U_e} = -\frac{R_2}{R_1} \Rightarrow R_1 = \frac{R_2}{15} = 1.2k\Omega$$

b)



$$U_e = I_1 R_1 + U_{ed} \quad (1)$$

$$I_2 = I_1 = \frac{v_g U_{ed} + U_{ed}}{r_{ag} + R_2} \quad (2)$$

$$U_a = I_2 r_{ag} - v_g U_{ed} \quad (3)$$

(1),(2):

$$U_e = \frac{v_g U_{ed} + U_{ed}}{r_{ag} + R_2} R_1 + U_{ed} = \frac{U_{ed}}{r_{ag} + R_2} ((v_g + 1) R_1 + r_{ag} + R_2)$$

(2),(3):

$$U_a = \frac{v_g U_{ed} + U_{ed} r_{ag}}{r_{ag} + R_2} - v_g U_{ed} = \frac{U_{ed}}{r_{ag} + R_2} (r_{ag} - v_g R_2)$$

$$v_r = \frac{U_a}{U_e} = \frac{r_{ag} - v_g R_2}{(v_g + 1) R_1 + R_2 + r_{ag}} = -14.76 \quad (4)$$

$$F = \frac{v_{r\infty} - v_r}{v_{r\infty}} = 1.6\%$$

c) Aus Glg. (4):

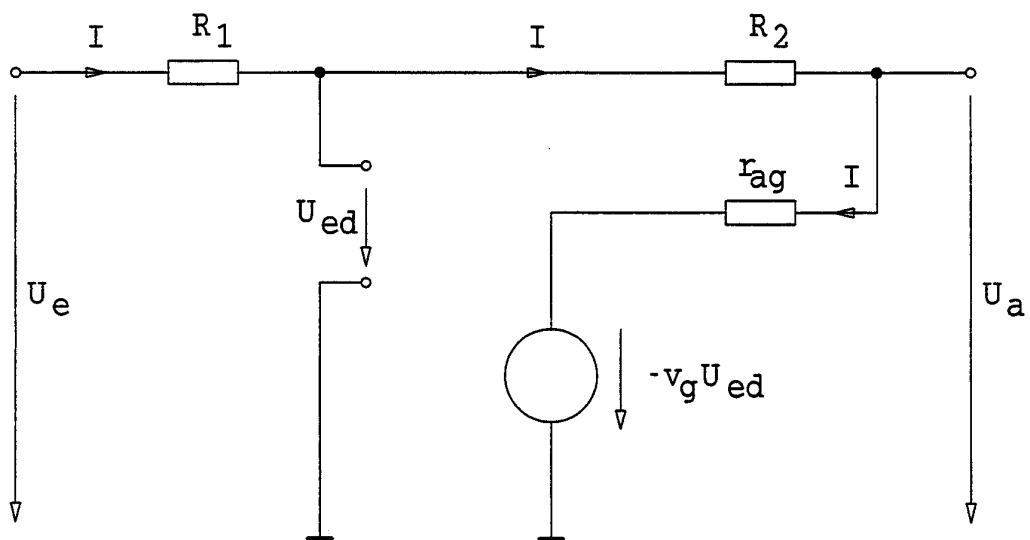
$$v_r = -15 \quad R_{1ges} = R_1 \parallel R'_1$$

$$\frac{r_{ag} - v_g R_2}{(v_g + 1) R_{1ges} + R_2 + r_{ag}} = -15 \Rightarrow R_{1ges} = \frac{1}{v_g + 1} \left( \frac{r_{ag} - v_g R_2}{v_r} - R_2 - r_{ag} \right)$$

$$R_{1ges} = 984 \Omega = R_1 \parallel R'_1 \Rightarrow R'_1 = 61.35 k\Omega$$

ad. 8b)

Kürzere Methode zur Berechnung des Verstärkungsfehlers



Annahme  $U_{ed} = 1mV$

$$-v_g U_{ed} = -1V$$

$$I = \frac{U_{ed} + v_g U_{ed}}{R_2 + r_{ag}} = 66.511 \mu A$$

$$U_a = -v_g U_{ed} + I r_{ag} = -0.9967V$$

$$U_e = I R_1 + U_{ed} = 67.512mV$$

$$v_r = -14.76$$

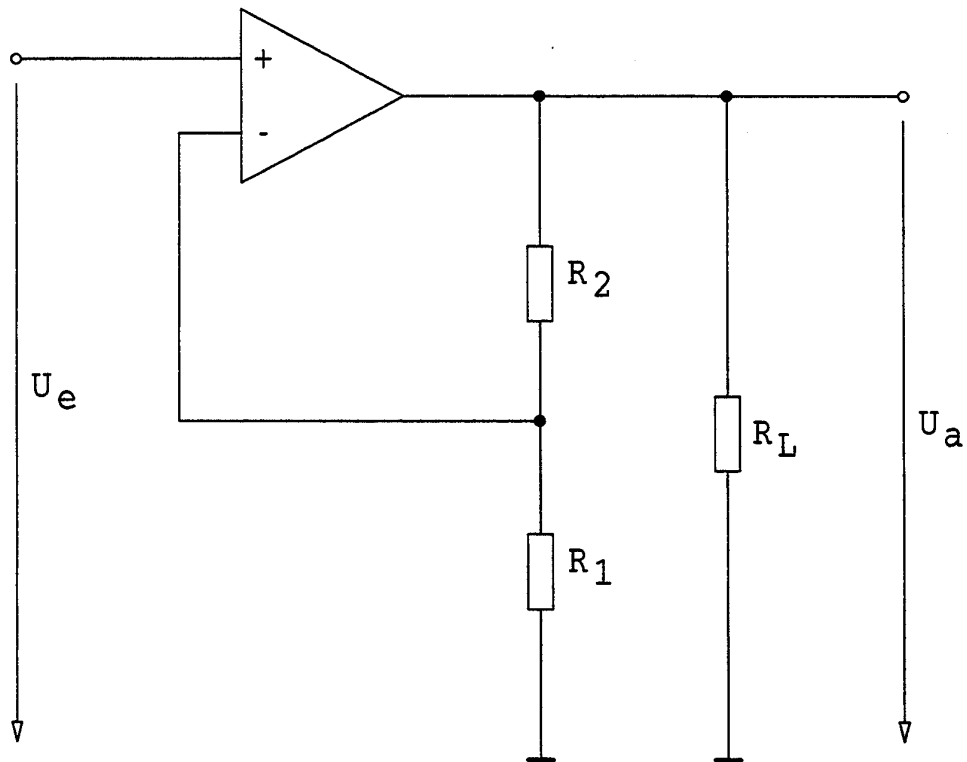
$$F = \frac{v_{r\infty} - v_r}{v_{r\infty}} = 1.6\%$$

c)

$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{-v_g U_{ed} + I r_{ag}}{I R_1'' + U_{ed}} \Rightarrow R_1'' = 983.97\Omega$$

$$R_1'' = R_1' || R_1 \Rightarrow R_1' = 61.35k\Omega$$

9) Operationsverstärker mit Elektrometer-Beschaltung



$$R_1 = 1.5k\Omega$$

$$R_2 = 39k\Omega$$

$$R_L = 100\Omega$$

$$v_g = 2000$$

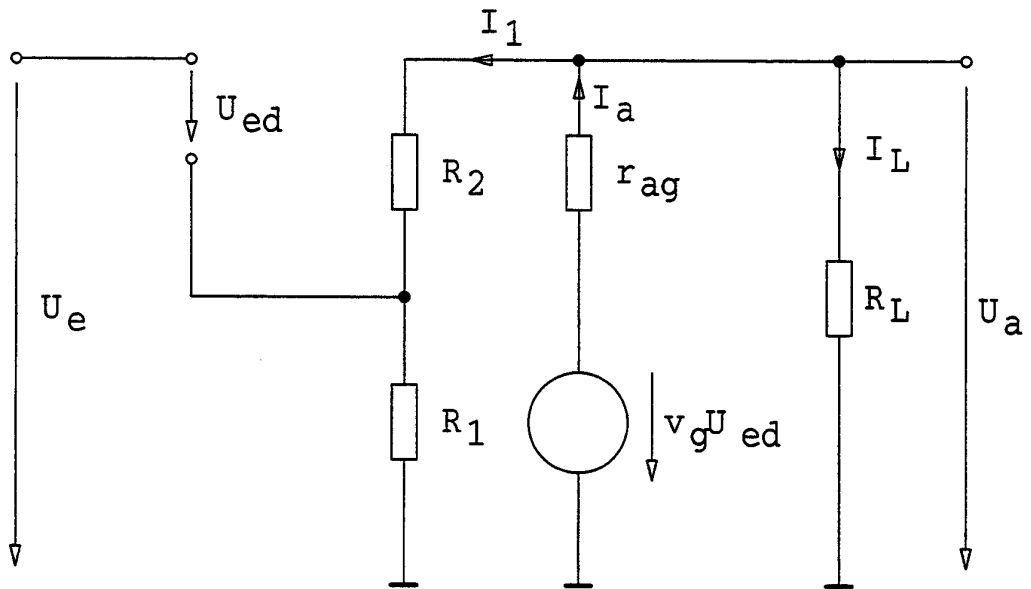
$$r_{ag} = 70\Omega$$

- Wie groß ist die Verstärkung ohne Last und mit idealem OPV?
- Wie groß ist die Verstärkung mit nichtidealem OPV ohne Last?
- Wie groß ist der Fehler mit nichtidealem OPV und Last gegenüber idealem OPV?

a)

$$v_{r\infty} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 27$$

b)



$$R_L = \infty \Rightarrow I_L = 0$$

$$I_a = I_1$$

$$U_e = U_{ed} + I_1 R_1 \quad (1)$$

$$U_a = I_a (R_1 + R_2) \quad (2)$$

$$v_g U_{ed} = I_a (r_{ag} + R_1 + R_2) \quad (3)$$

Aus (3):

$$U_{ed} = \frac{I_a}{v_g}(r_{ag} + R_1 + R_2)$$

in Glg. (1):

$$U_e = \frac{I_a}{v_g}(r_{ag} + R_1 + R_2) + I_a R_1$$

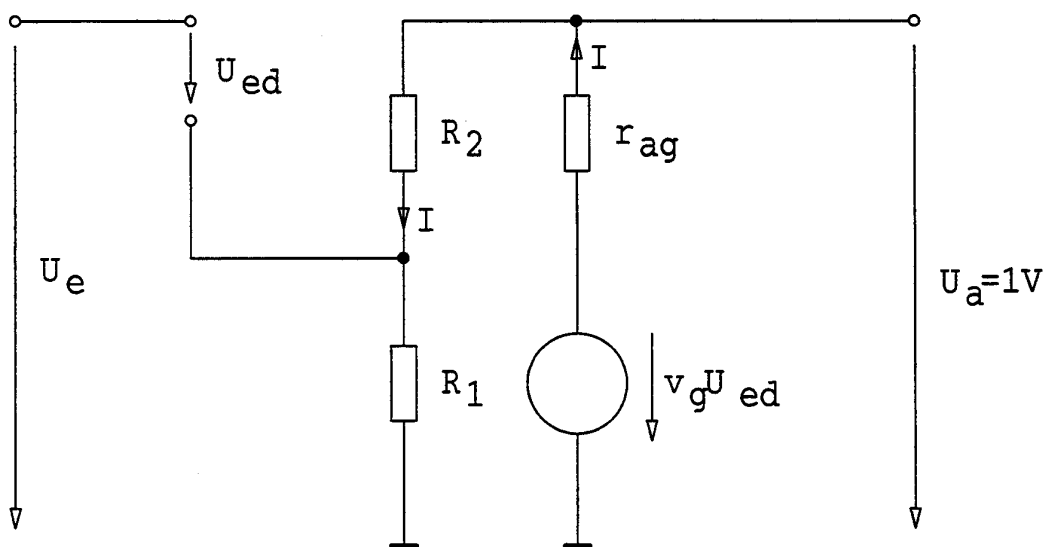
$$v_r = \frac{U_a}{U_e} = \frac{I_a (R_1 + R_2)}{I_a \left( \frac{1}{v_g}(r_{ag} + R_1 + R_2) + R_1 \right)} =$$

$$= \frac{v_g (R_1 + R_2)}{r_{ag} + R_1 + R_2 + v_g R_1} = 26.64$$

ad b)

Vorgangsweise ohne Ansetzen von Maschen: Annehmen einer Ausgangsspannung

$U_a = 1V$ :



$$I = \frac{U_a}{R_1 + R_2} = 24.691 \mu A$$

$$v_g U_{ed} = U_a + I r_{ag} \Rightarrow U_{ed} = 0.5 mV$$

$$U_e = U_{ed} + I R_1 = 0.03753 V$$

$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{1V}{37.5mV} = 26.64$$

c)

$$I_a = I_1 + I_L$$

$$\frac{v_g U_{ed} - U_a}{r_{ag}} = \frac{U_a}{R_1 + R_2} + \frac{U_a}{R_L}$$

$$v_g U_{ed} = U_a \left( \frac{r_{ag}}{R_1 + R_2} + \frac{r_{ag}}{R_L} + 1 \right)$$

$$U_e = U_{ed} + U_{R1} = U_{ed} + U_a \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$U_{ed} = U_e - U_a \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

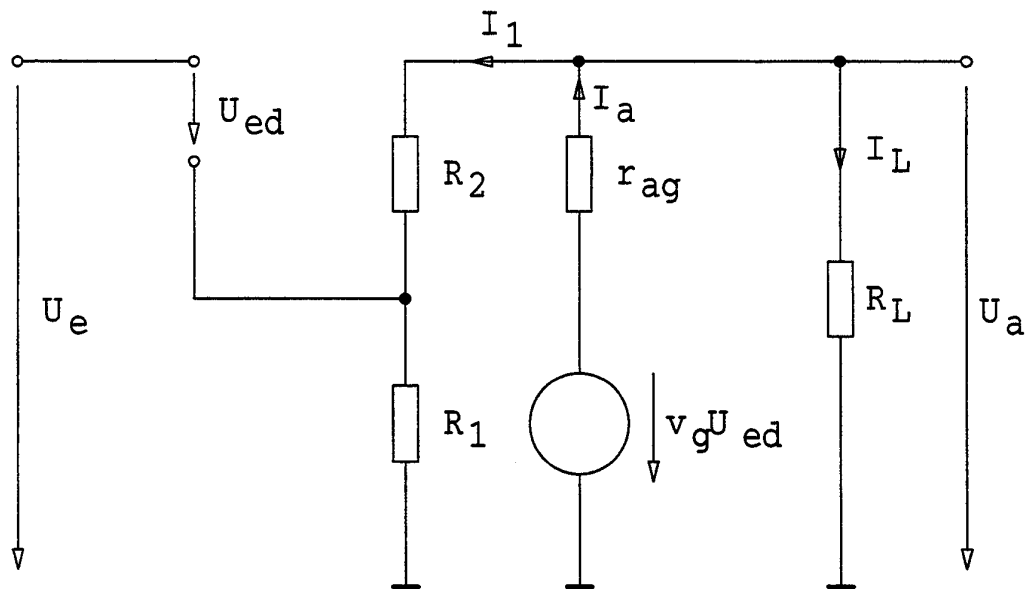
$$v_g U_{ed} = U_a \left( \frac{r_{ag}}{R_1 + R_2} + \frac{r_{ag}}{R_L} + 1 \right) = v_g U_e - v_g U_a \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$U_e = \frac{1}{v_g} U_a \left( \frac{r_{ag}}{R_1 + R_2} + \frac{r_{ag}}{R_L} + 1 + v_g \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)$$

$$v_r = \frac{U_a}{U_e} = \frac{v_g}{\frac{r_{ag}}{R_1 + R_2} + \frac{r_{ag}}{R_L} + 1 + v_g \frac{R_1}{R_1 + R_2}} = 26.39$$

$$F = \frac{v_{r\infty} - v_r}{v_{r\infty}} = 2.2\%$$

ad c)



Annahme  $U_a = 1V$

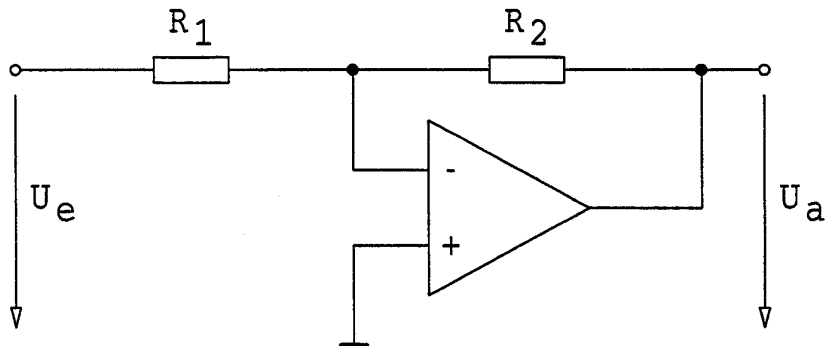
$$I_a = \frac{U_a}{(R_1 + R_2) \parallel R_L} = 10.025mA$$

$$v_g U_{ed} = U_a + I_a r_{ag} \Rightarrow U_{ed} = 0.8508mV$$

$$U_e = U_{ed} + R_1 I_1 = U_{ed} + R_1 \frac{U_a}{R_1 + R_2} = 37.888mV$$

$$\frac{U_a}{U_e} = v_r = 26.39 \quad F = \frac{v_{r\infty} - v_r}{v_{r\infty}} = 2.2\%$$

10) Operationsverstärker mit invertierender Beschaltung.



$$R_1 = 2k\Omega$$

$$U_0 \in (-5mV \dots +5mV)$$

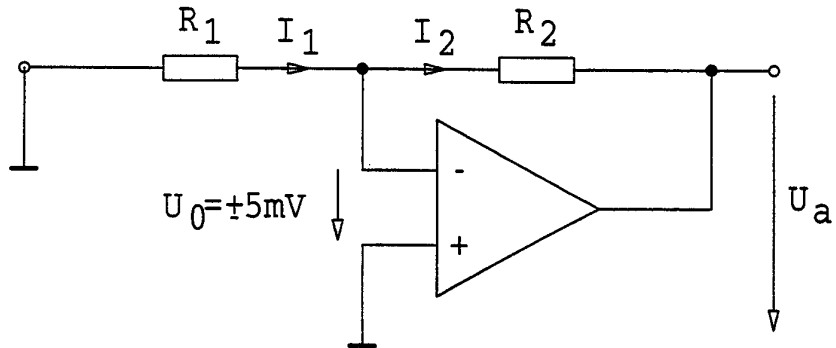
- a) Gesucht ist  $R_2$ , damit für  $U_e = -100mV$   $U_a = 5V$  wird (idealer OPV).
- b) In welchem Bereich liegt  $U_a$  für  $U_e = 0V$ ?
- c) In welchem Bereich liegt  $U_a$ , wenn  $U_e = -100mV$  beträgt (unter der Berücksichtigung der Offsetspannung  $U_0$ )?

a)

$$v_{r\infty} = -\frac{R_2}{R_1} = \frac{U_a}{U_e}$$

$$R_2 = -\frac{U_a}{U_e} R_1 = 100k\Omega$$

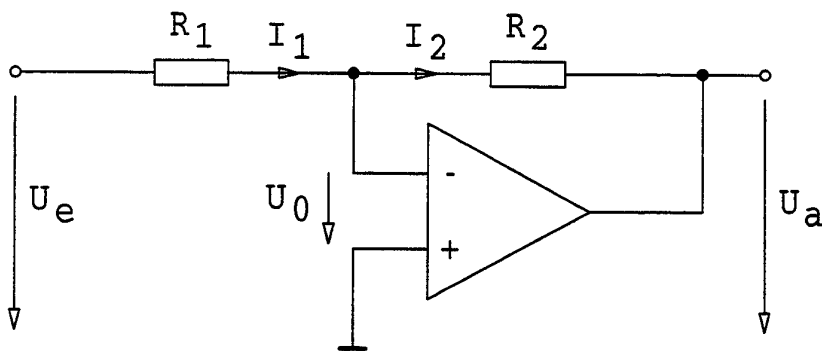
b)



$$I_1 = I_2 = \frac{-U_0}{R_1} = \frac{U_0 - U_a}{R_2} \Rightarrow -U_0 \frac{R_2}{R_1} = U_0 - U_a$$

$$U_a = +U_0 \frac{R_2}{R_1} + U_0 = U_0 \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \Rightarrow U_a \in \{-255mV \dots +255mV\}$$

c)

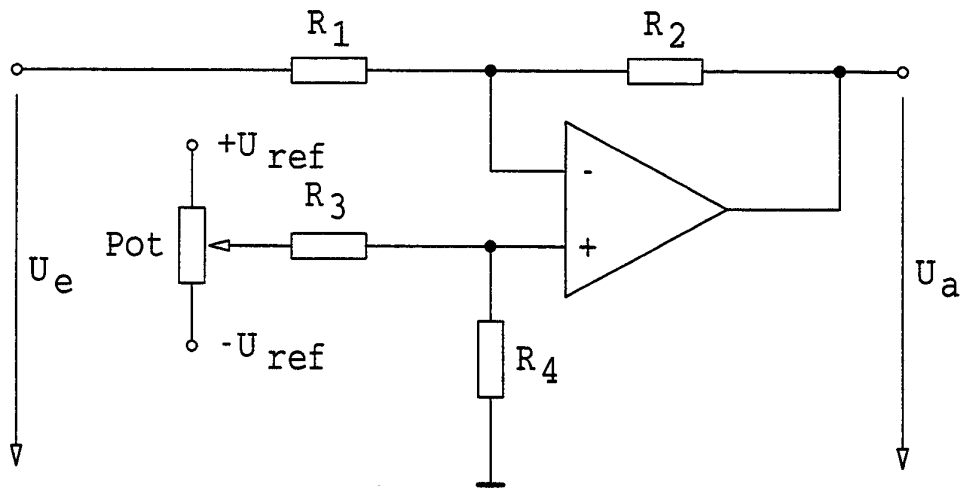


$$I_1 = I_2 = \frac{U_e - U_0}{R_1} = \frac{U_0 - U_a}{R_2}$$

$$U_a = U_0 - (U_e - U_0) \frac{R_2}{R_1} \Rightarrow U_a \in \{5.255V \dots +4.745V\}$$

Einfacher: Superposition, zuerst nur Offset betrachten ( $U_e = 0$ ), dann Offset  $U_0 = 0$  und nur  $U_e$  betrachten.

11) OPV mit invertierender Beschaltung und Offsetspannungskorrektur



$$R_1 = 2.7k\Omega$$

$$R_2 = 270k\Omega$$

$$R_{Pot} = 10k\Omega$$

$$U_0 \in (-5mV... + 5mV)$$

$$I_0 \in (-5nA... + 5nA)$$

$$U_{Ref} = 5V$$

- a) Wie groß ist die Verstärkung bei idealem OPV und Mittelstellung des Potentiometers?
- b) Dimensionieren Sie  $R_3$  und  $R_4$  so, daß  $U_0$  korrigiert werden kann, wobei  $R_3$  und  $R_4$  möglichst hochohmig sein sollen, der Einfluß von  $I_0$  aber nicht stärker als 1% von  $U_0$  sein soll.

a)

Mittelstellung:  $\Rightarrow U_{R3} = 0V$

Grundschialtung des invertierenden OPV's:

$$v_{r\infty} = \frac{U_a}{U_e} = -\frac{R_2}{R_1} = -100$$

b)

Einstellbereich von  $U_{R4} \in (-5mV \dots + 5mV)$

$$U_{R4} = U_{Ref} \frac{R_4}{R_3 + R_4} \Rightarrow \frac{R_4}{R_3 + R_4} = \frac{U_{R4}}{U_{Ref}} = 10^{-3} \quad (1)$$

Da  $R_3 \gg R_4 \Rightarrow R_i$  des Offsetnetzwerkes  $\sim R_4$

Abschätzung des Einflusses von  $I_0$

$$U_{R4} = I_0 R_4 \leq 0.01 U_0 = 50 \mu V$$

$$R_4 = \frac{50 \mu V}{5 n A} = 10 k \Omega$$

Aus (1) folgt:

$$R_3 = 9.99 M \Omega$$