

Elektronische Schaltungen SS 2020

3. Tutoriumsblatt - Lösung

Feldeffekttransistoren

– Abgabe –

Aufgabe 1 (JFET)

- a) Grundschialtung: Sourceschaltung mit Stromgegenkopplung.
- b) Das Großsignalersatzschaltbild ist in Abbildung 1 zu sehen.

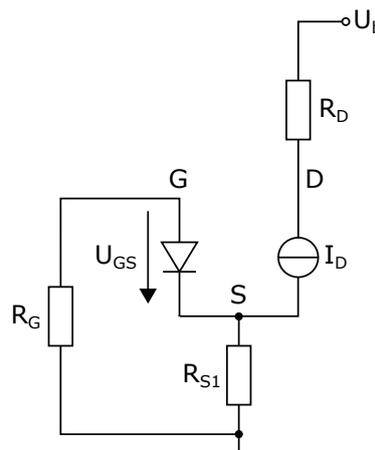


Abbildung 1

c) Das Kleinsignalersatzschaltbild ist in Abbildung 2 zu sehen.

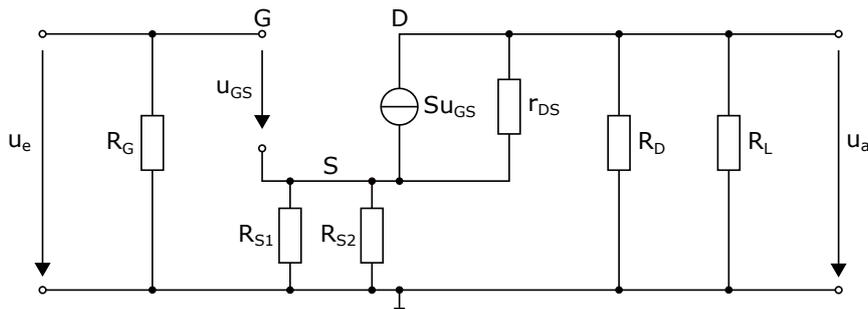


Abbildung 2

d) Der Transistor verträgt laut Datenblatt maximal $P_{\text{tot}} = 250 \text{ mW}$. Bei 20 V Versorgungsspannung und Vernachlässigung der Spannungsabfälle über R_D und $R_{S1,2}$ ergibt sich der maximale Strom zu:

$$I_{\text{max}} = \frac{250 \text{ mW}}{20 \text{ V}} = 12,5 \text{ mA}.$$

e) Die Diode ist bei einem JFET immer in Sperrrichtung betrieben. Es fließt maximal ein Sperrstrom von $I_{\text{GSS}} = 1000 \text{ pA} = 1 \text{ nA}$.

f) Gesucht ist hier I_{D0} , das ist der Strom I_D der bei $U_{\text{GS}} = 0$ fließt. Er beträgt laut Datenblatt maximal $6,5 \text{ mA}$.

g) Der minimale Gatestrom fließt über R_G ab, daher liegt die Spannung $U_g = 1 \text{ nA} \cdot 250 \text{ k}\Omega = 0,25 \text{ mV}$ an. Selbst bei idealer Betrachtung, d.h. wenn kein Gatestrom fließen würde, wäre R_G notwendig, um das Potential am Gate auf Masse zu ziehen.

h) U_{GS} muss immer negativ sein, damit der JFET richtig funktioniert. Da die Versorgungsspannung nicht negativ ist, muss das Source Potential durch R_{S1} angehoben werden. Die Stromgegenkopplung ist somit unerlässlich.

i) U_{th} beträgt laut Datenblatt maximal $V_{\text{GSoff}} = -2,2 \text{ V}$.

– Im Tutorium –

Aufgabe 2 (CMOS)

a) Aufstellen der Maschenregel ergibt (siehe Abbildung 3):

$$U_{GSn} = u_e - U_{b-}$$

$$U_{GSp} = u_e - U_{b+}$$

$$U_{DSn} = u_a - U_{b-}$$

$$U_{DSp} = u_a - U_{b+}$$

Mit $u_e = u_a = 0\text{ V}$:

$$U_{GSn} = +10\text{ V}$$

$$U_{GSp} = -10\text{ V}$$

$$U_{DSn} = +10\text{ V}$$

$$U_{DSp} = -10\text{ V}$$

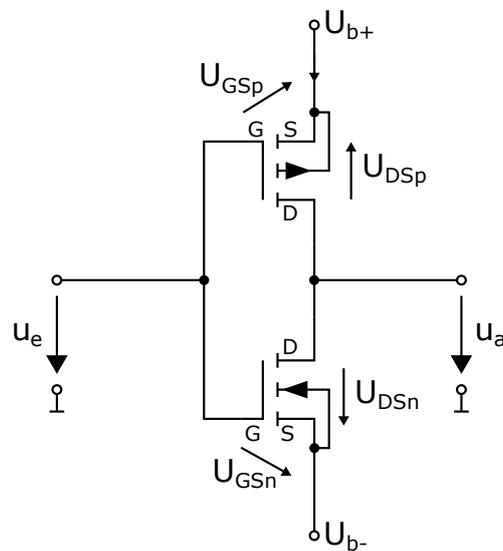


Abbildung 3

b) Bedingung für Sättigung: n-Kanal: $U_{DSn} \geq U_{GSn} - U_{thn}$, p-Kanal: $U_{DSp} \leq U_{GSp} - U_{thp}$

$$U_{DSn} = 10 \text{ V} \geq U_{GSn} - U_{thn} = 7 \text{ V}$$

$$U_{DSp} = -10 \text{ V} \geq U_{GSp} - U_{thp} = -7 \text{ V}$$

Damit ist bewiesen: Im Arbeitspunkt sind beide Transistoren im Sättigungsbereich.

c) I_D im Sättigungsbereich berechnet sich wie folgt:

$$I_D = \frac{\beta}{2}(U_{GS} - U_{th})^2 \left(1 + \frac{U_{DS}}{|U_A|}\right)$$

$$= \frac{1}{2} \cdot 153 \frac{\mu\text{A}}{\text{V}^2} (10 \text{ V} - 3 \text{ V})^2 \left(1 + \frac{10 \text{ V}}{200 \text{ V}}\right) = 3,94 \text{ mA}$$

d) Die statische Verlustleistung berechnet sich zu:

$$P_V = U \cdot I = U_b \cdot I_{D,A} = 20 \text{ V} \cdot 3,94 \text{ mA} = 78,7 \text{ mW}$$

e) Die Steilheit im Arbeitspunkt berechnet sich zu:

$$S = \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} = \beta(U_{GS} - U_{th}) \cdot \left(1 + \frac{U_{DS}}{|U_D|}\right) = 1,125 \text{ mS}$$

f) Das Kleinsignalersatzschaltbild ist in Abbildung 4 zu sehen.

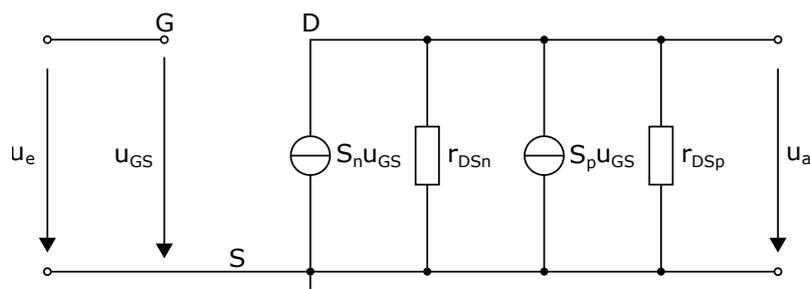


Abbildung 4

g) Die Kleinsignalverstärkung A berechnet sich zu:

1. Aufstellen der Gleichung für u_a . Mit Knotengleichung:

$$\begin{aligned} 0 &= S_n \cdot u_{GS} + S_p \cdot u_{GS} + \frac{u_a}{r_{DS,n}} + \frac{u_a}{r_{DS,p}} \\ u_a &= -\frac{(S_n + S_p)u_{GS}}{\frac{1}{r_{DS,n}} + \frac{1}{r_{DS,p}}} \\ &= -\frac{(S_n + S_p)u_{GS}}{\frac{r_{DS,n} + r_{DS,p}}{r_{DS,n} \cdot r_{DS,p}}} \\ &= -(S_n + S_p)u_{GS} \cdot (r_{DS,n} \parallel r_{DS,p}) \end{aligned}$$

Diesen Zusammenhang erhält man auch, wenn die beiden Stromquellen und die beiden Widerstände zusammengefasst werden und dann das Ohmsche Gesetz angewendet wird mit der Annahme, dass $i_a = 0$.

2. Daraus folgt für A

$$A = \frac{u_a}{u_e} = -\frac{(S_n + S_p)u_{GS} \cdot (r_{DS,n} \parallel r_{DS,p})}{u_e}$$

Mit $u_e = u_{GS}$, $S_n = S_p = S$, $r_{DSn} = r_{DSp} = r_{DS}$

$$A = \frac{r_e(2S \cdot \frac{r_{DS}}{2})}{u_e} = -S \cdot r_{DS}$$

Berechnung von r_{DS} :

Variante 1:

$$r_{DSn} = r_{DSp} = \frac{\Delta U_{DS}}{I_D} = \frac{|U_A| + U_{DS,A}}{I_{D,A}} = \frac{210 \text{ V}}{3,95 \text{ mA}} = 53,48 \text{ k}\Omega$$

Variante 2:

Für 2 verschiedene Drain-Source Spannungen den Drainstrom berechnen:

1. Wert - Drainstrom im Arbeitspunkt: $I_{D1} = I_{DA} = 3,94 \text{ mA}$

2. Wert - z.B. bei $U_{DS} = 20 \text{ V}$:

$$I_D = \frac{\beta}{2}(U_{GS} - U_{th})^2 \cdot \left(1 + \frac{20 \text{ V}}{200 \text{ V}}\right) = 4,12 \text{ mA}$$

Daraus folgt:

$$\begin{aligned}\Delta I_D &= 4,12 \text{ mA} - 3,94 \text{ mA} = 187 \mu\text{A} \\ \Delta U_{DS} &= 20 \text{ V} - 10 \text{ V} = 10 \text{ V}\end{aligned}$$

Damit kann r_{DS} bestimmt werden zu

$$r_{DS} = \frac{\Delta U_{DS}}{\Delta I_D} = 53,48 \text{ k}\Omega$$

Die Verstärkung berechnet sich zu:

$$A = -S \cdot r_{DS} = -60,2$$

Aufgabe 3 (JFET)

- Grundschialtung: Sourceschialtung mit Gleichstromgegenkopplung.
- Das Großsignalersatzschaltbild ist in Abbildung 5 zu sehen.

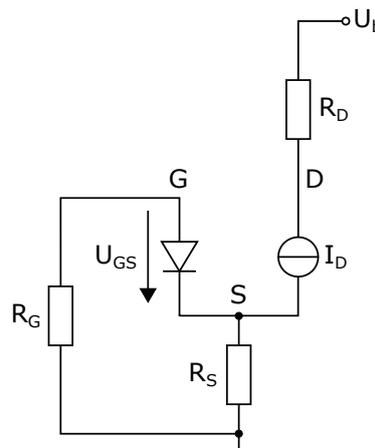


Abbildung 5

c) Der Drainstrom I_{D0} ist definiert, als der Strom im Sättigungsbereich des Kennlinienfeldes bei $U_{GS} = 0 \text{ V} \rightarrow I_{D0} = 10 \text{ mA}$.

d) $I_D = I_S$, woraus folgt:

$$R_S = -\frac{U_{GS}}{I_D} = \frac{2 \text{ V}}{2,5 \text{ mA}} = 800 \Omega$$

e) Die Lastgerade kann auf zwei verschiedene Weisen bestimmt werden.

1. Variante: Die Einstellung des Arbeitspunkts der Schaltung erfolgt durch Gleichspannungen. Zwischen U_b und Masse liegt R_D , der Transistor (U_{DS}) und R_S . Der Gesamtwiderstand ist damit: $R_D + R_S = 4,4 \text{ k}\Omega$. Die Lastgerade hat damit die Steigung: $-1/(R_D + R_S)$.
2. Variante: 2 Punkte berechnen, wodurch die Lastgerade gezeichnet werden kann

$$U_b = I_D \cdot (R_D + R_S) + U_{DS}$$

$$I_D = \frac{U_b - U_{DS}}{R_D + R_S}$$

für $I_D = 0 \rightarrow U_{DS} = U_b = 20 \text{ V}$

$$\text{für } U_{DS} = 0 \rightarrow I_D = \frac{20 \text{ V}}{4,4 \text{ k}\Omega} = 4,55 \text{ mA}$$

Durch einzeichnen der Lastgerade (siehe Abbildung 6), erhält man den Arbeitspunkt an dem Schnittpunkt mit dem Ausgangskennlinienfeld. Bei $U_{GS} = -2 \text{ V}$ ergibt sich $U_{DS} = 9 \text{ V}$.

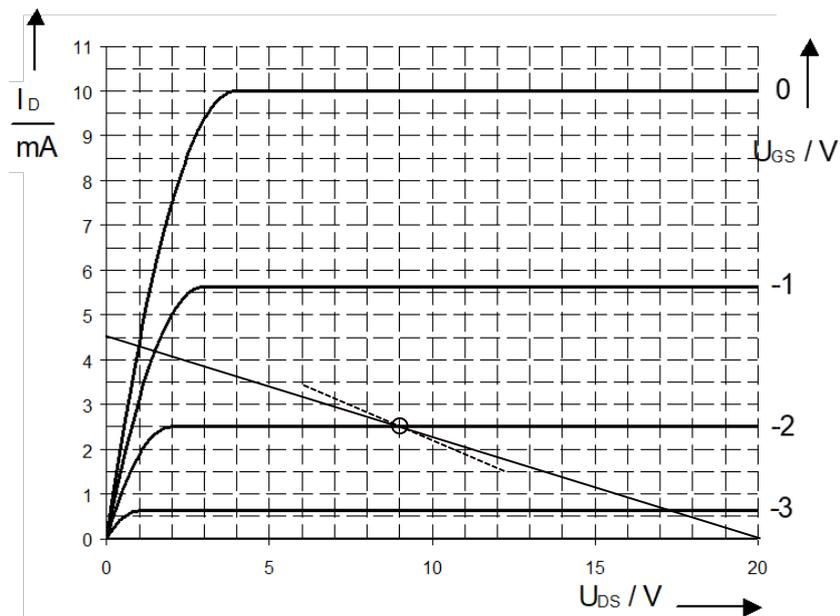


Abbildung 6

f) Das Kleinsignalersatzschaltbild ist in Abbildung 7 zu sehen.

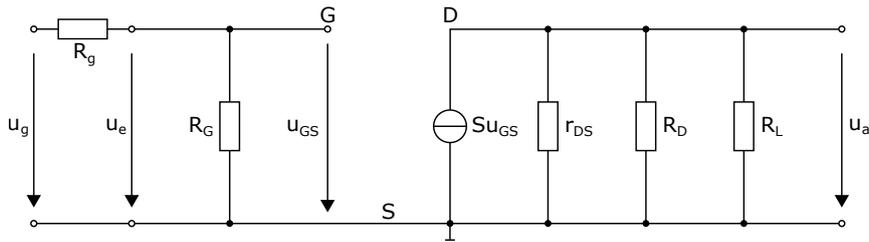


Abbildung 7

g) Der differentielle Eingangswiderstand des Transistors wird als sehr groß ($\rightarrow \infty$) angenommen. Deshalb gilt:

$$r_e = R_G = 820 \text{ k}\Omega$$

h) Aus dem Kennlinienfeld müssen Wertepaare ermittelt (siehe Abbildung 8), I_D ausgerechnet und in ein $\sqrt{I_D} - U_{GS}$ Diagramm eintragen werden (siehe Abbildung 9). Folgende Werte ergeben sich:

$U_{GS}(\text{V})$	$I_D(\text{mA})$	$\sqrt{I_D}$
0	10	3,16
-1	5,6	2,37
-2	2,5	1,58

Der Schnittpunkt mit der U_{GS} -Achse ist die Schwellspannung, die sich zu $U_{th} = -4 \text{ V}$ ergibt.

i) Berechnung der Steilheit:

$$\begin{aligned} S &= \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} = 2 \frac{I_{D0}}{U_{th}^2} (U_{GS} - U_{th}) \\ &= 2 \frac{10 \text{ mA}}{(-4 \text{ V})^2} (-2 \text{ V} + 4 \text{ V}) = 2,5 \frac{\text{mA}}{\text{V}} \end{aligned}$$

Berechnung der Spannungsverstärkung:

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

$$\text{mit: } u_e = u_{GS}, u_a = -S u_{GS} (R_D \parallel R_L)$$

$$A = -S \cdot (R_D \parallel R_L) = -2,5 \frac{\text{mA}}{\text{V}} \cdot 3,6 \cdot 10^3 \frac{\text{V}}{\text{A}} = -9$$

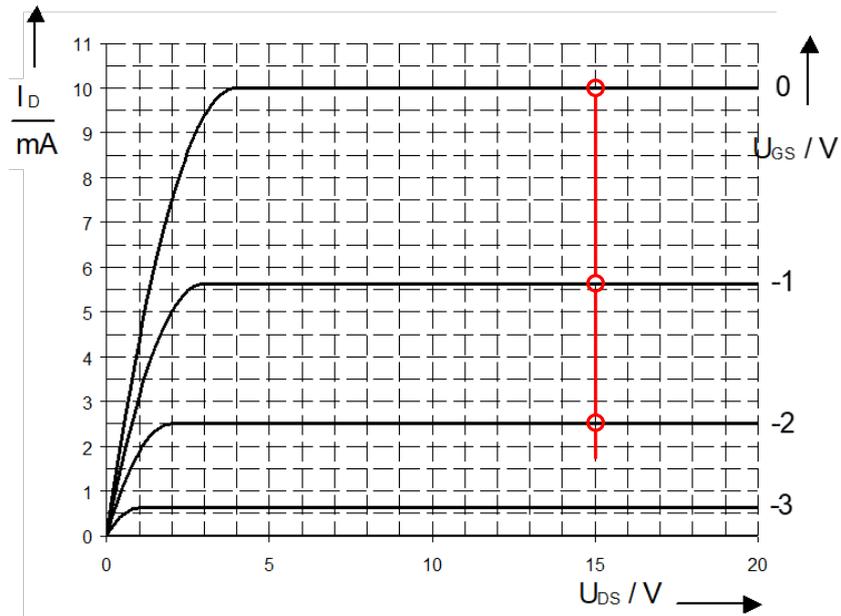


Abbildung 8

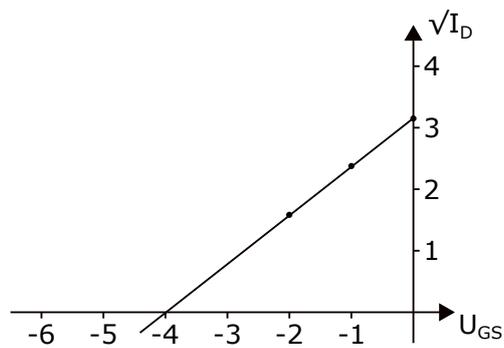


Abbildung 9

- j) Der Lastwiderstand bei Wechselspannung ist $R_D \parallel R_L \approx 3,6 \text{ k}\Omega$.
 → Die Steigung der Lastgeraden im Arbeitspunkt beträgt: $-1/3,6 \text{ k}\Omega = -0,277 \text{ mA/V}$ (gestrichelte Gerade im Kennlinienfeld).

Aufgabe 4 (MOSFET)

a) Grundschialtung: Sourceschialtung.

b) Das Großsignalersatzschaltbild ist in Abbildung 10 zu sehen.

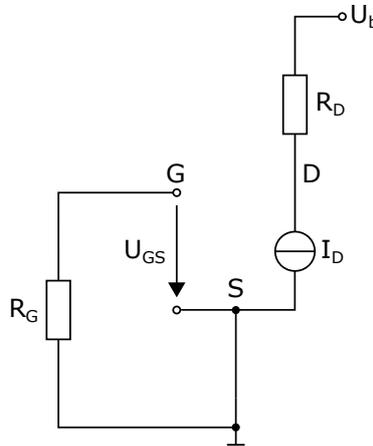


Abbildung 10

c) Der sogenannte lineare oder ohmsche Bereich eines Feldeffekttransistors ist der Bereich des Kennlinienfeldes, in dem die Kennlinie noch ansteigt. Es gilt: $U_{DS} < U_{GS} - U_{th}$.

Der Sättigungsbereich (Arbeitsbereich für analoge Schaltungen) ist der Bereich des Kennlinienfeldes, in dem die Kennlinie einen etwa konstanten Strom liefert. Es gilt: $U_{DS} \geq U_{GS} - U_{th}$.

Einsetzen der Werte ergibt $U_{DS} = 2\text{ V} < 3,5\text{ V} = U_{GS} - U_{th}$. Der gemessene Punkt befindet sich somit im linearen Bereich.

Der Drainstrom berechnet sich zu:

$$\begin{aligned} I_D &= 2 \frac{I_{D0}}{U_{th}^2} \left[(U_{GS} - U_{th}) \cdot U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2} \right] \\ &= 2 \frac{2\text{ mA}}{(-1,5\text{ V})^2} \left[(2\text{ V} - (-1,5\text{ V})) \cdot 2\text{ V} - \frac{(2\text{ V})^2}{2} \right] \\ &= 22,2\text{ mA} \end{aligned}$$

d) Wenn der Arbeitspunkt bei der Hälfte der Versorgungsspannung liegen soll (d.h. $U_{DS} = 6\text{ V}$), dann muss gelten:

$$R_D = \frac{U_b/2}{I_{D0}} = \frac{10\text{ V}}{5\text{ mA}} = 2\text{ k}\Omega$$

e) Die Steilheit berechnet sich zu:

$$\begin{aligned}
 S &= 2 \cdot \frac{I_{D0}}{U_{th}^2} (U_{GS} - U_{th}) \\
 &= 2 \cdot \frac{5 \text{ mA}}{(-1,5 \text{ V})^2} 1,5 \text{ V} \\
 &= 6,66 \frac{\text{mA}}{\text{V}}
 \end{aligned}$$

f) Das Kleinsignalersatzschaltbild ist in Abbildung 11 zu sehen.

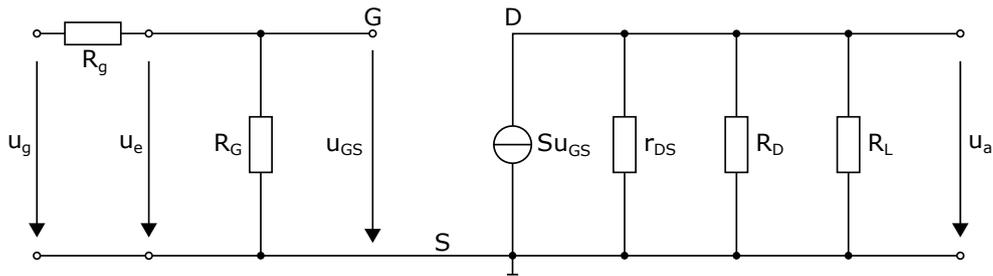


Abbildung 11

g) Mit dem Spannungsteiler lässt sich R_G wie folgt berechnen:

$$\begin{aligned}
 u_e &= u_g \frac{R_G}{R_G + R_g} \\
 \rightarrow R_G &= R_g \frac{u_e}{u_g - u_e} = 510 \text{ k}\Omega
 \end{aligned}$$

h) Da die Spannungsverstärkung nicht kleiner als 10 V werden soll und $S = 6,66 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$ (Aufgabenteil e), ergibt sich

$$\begin{aligned}
 |A| &= S \cdot R_{L,\text{eff}} \geq 10 \\
 \rightarrow R_{L,\text{eff}} &\geq 1500 \Omega, \text{ mit: } R_{L,\text{eff}} = \frac{R_D \cdot R_L}{R_D + R_L} \\
 R_L &= \frac{R_D \cdot R_{L,\text{eff}}}{R_D - R_{L,\text{eff}}} = 6 \text{ k}\Omega
 \end{aligned}$$

i)

1. Der Arbeitspunkt kann nur durch Hinzufügen eines Widerstands am Source eingestellt werden. Um die Wechselspannungsverstärkung zu erhalten muss noch ein C parallel geschaltet werden. (Sourceschaltung mit Gleichstromgegenkopplung), siehe Abbildung 12.

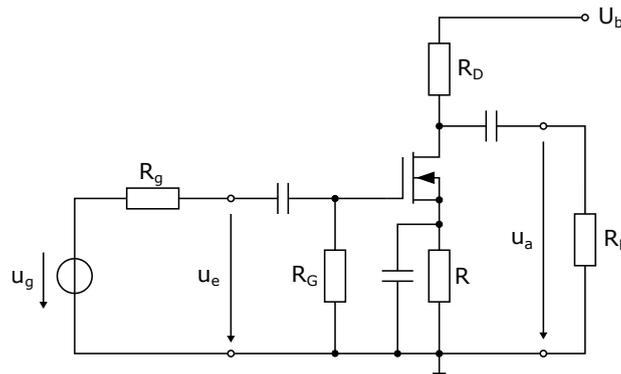


Abbildung 12

2. Der Drainstrom berechnet sich zu

$$I_D = \frac{I_{D0}}{U_{th}^2} (U_{GS} - U_{th})^2 = \frac{5 \text{ mA}}{(1,5 \text{ V})^2} (-0,5 \text{ V} - (-1,5 \text{ V}))^2 = 2,22 \text{ mA}$$

Dadurch ergibt sich für R_S :

$$R_S = \frac{0,5 \text{ V}}{2,22 \text{ mA}} = 225 \Omega$$

Die Drain-Source Spannung berechnet sich zu:

$$U_{DS} = U_b - I_D (R_S + R_D) = 15,05 \text{ V}$$

3. Damit der Arbeitspunkt wieder bei $U_{DS} = 10 \text{ V}$ liegt muss R_D verändert werden.

$$R_D = \frac{U_b - U_{DS} - I_D \cdot R_S}{I_D} = 4,28 \text{ k}\Omega$$

4. Mit einer anderen Gate-Spannung ändert sich ebenfalls die Steilheit S und der Verstärkung zu:

$$S = 2 \cdot \frac{5 \text{ mA}}{(-1,5 \text{ V})^2} (-0,5 \text{ V} - (-1,5 \text{ V})) = 4,44 \text{ mS}$$

$$A = -S \cdot r_a = -4,44 \text{ mS} \cdot (4,28 \text{ k}\Omega \parallel 6 \text{ k}\Omega) = -11,1$$

– Optional –

Aufgabe 5

a) Das Großsignalersatzschaltbild ist in Abbildung 13 zu sehen.

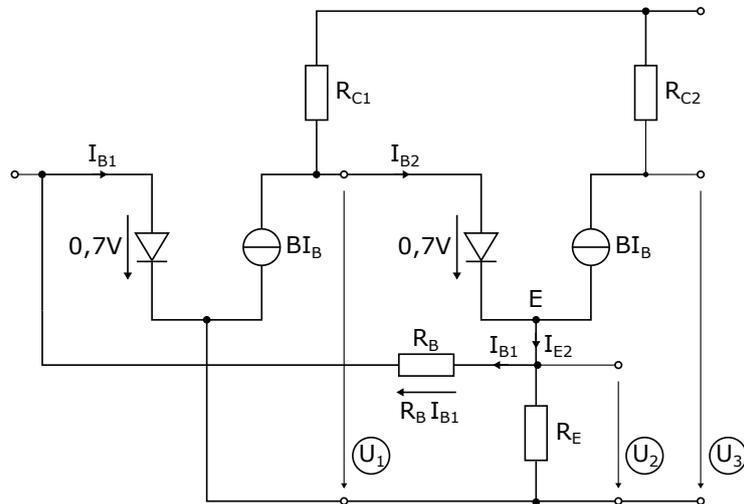


Abbildung 13

b) Folgende Gleichungen können aufgestellt werden:

Maschenregel:

$$U_2 = (I_{E2} - I_{B1})R_E = R_B I_{B1} + 0,7V \quad (1)$$

$$U_1 = 0,7V + U_2 = 0,7V + R_B I_{B1} + 0,7V = 1,4V + R_B I_{B1} = U_V - R_{C1}(I_{C1} + I_{B2}) \quad (2)$$

Knotenregel:

$$I_{E2} = I_{B1} + \frac{U_2}{R_E} = I_{B1} + \frac{R_B I_{B1} + 0,7V}{R_E} = \frac{0,7V}{R_E} + \left(1 + \frac{R_B}{R_E}\right) \cdot I_{B1}$$

$$I_{B2} = \frac{I_{E2}}{B+1} = \frac{1}{B+1} \left(I_{B1} + \frac{U_2}{R_E} \right) = \frac{1}{B+1} \left[\frac{0,7V}{R_E} + \left(1 + \frac{R_B}{R_E}\right) \cdot I_{B1} \right]$$

Einsetzen von I_{B2} und I_{C1} in (2):

$$1,4 \text{ V} + R_B I_{B1} = U_V - R_{C1}(I_{C1} + I_{B2})$$

$$1,4 \text{ V} + R_B I_{B1} = 12 \text{ V} - R_{C1} \left\{ B \cdot I_{B1} + \frac{1}{B+1} \left[\frac{0,7 \text{ V}}{R_E} + \left(1 + \frac{R_B}{R_E} \right) \cdot I_{B1} \right] \right\}$$

$$I_{B1} \left[R_B + B \cdot R_{C1} + \frac{R_{C1}}{B+1} \left(1 + \frac{R_B}{R_E} \right) \right] = 12 \text{ V} - 1,4 \text{ V} - \frac{0,7 \text{ V} \cdot R_{C1}}{(B+1) \cdot R_E}$$

Einsetzen der Werte ergibt für I_{B1}

$$I_{B1} = 0,972 \mu\text{A}.$$

Daraus ergibt sich für I_{B2} und I_{C2} :

$$I_{B2} = 5,62 \mu\text{A}$$

$$I_{C2} = B I_{B2} = 0,562 \text{ mA}$$

Daraus lassen sich die Spannungen an den drei Punkten berechnen:

$$U_1 = 1,72 \text{ V}$$

$$U_2 = 1,02 \text{ V}$$

$$U_3 = 5,25 \text{ V}$$

c) Das Kleinsignalersatzschaltbild ist in Abbildung 14 zu sehen.

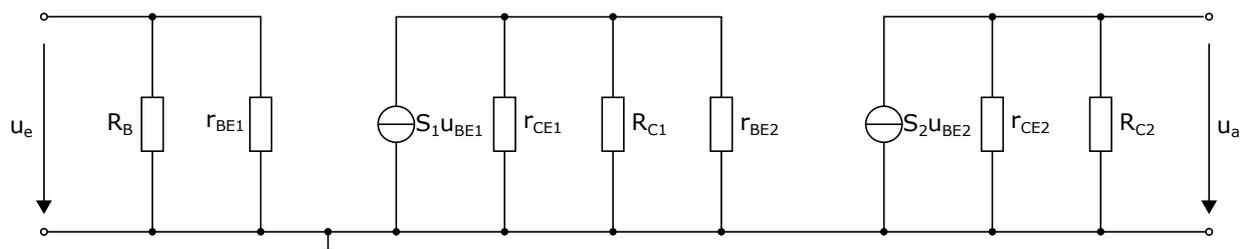


Abbildung 14

d) Der Eingangswiderstand berechnet sich zu

$$r_e = R_B \parallel r_{BE1} \text{ mit } r_{BE1} = \frac{\beta}{S_1} = \frac{U_T}{I_{B1}}$$
$$r_e = 330 \text{ k}\Omega \parallel 26,7 \text{ k}\Omega = 24,7 \text{ k}\Omega$$

e) An der Schaltung ist kein Lastwiderstand angeschlossen. Damit ergibt sich für den Ausgangswiderstand

$$r_a = R_{C2} = 12 \text{ k}\Omega$$

f) Die Spannungsverstärkung berechnet sich zu:

$$A = \frac{u_a}{u_e} = \frac{u_a}{u_{12}} \frac{u_{12}}{u_e} = A_1 \cdot A_2$$

Die einzelnen Spannungsverstärkungen berechnen sich zu:

$$A_1 = -S_1 \cdot R_{L1} = -S_1 \cdot (R_{C1} \parallel r_{BE2}) = -S_1 \cdot \left(R_{C1} \parallel \frac{\beta}{S_2} \right) \text{ mit } S_2 = \frac{I_{C2}}{U_T} = 21,6 \text{ mS}$$
$$= -13,7$$
$$A_2 = -S_2 \cdot R_{C2} = -259,2$$

Dadurch ergibt sich die Gesamtverstärkung zu

$$A = A_1 \cdot A_2 = -236,4 \cdot -13,7 = 4276$$

Aufgabe 6

- a) Transistor 1: Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung
 Transistor 2: Emitterschaltung mit Gleichstromgegenkopplung

- b) Das Großsignalersatzschaltbild ist in Abbildung 15 zu sehen.

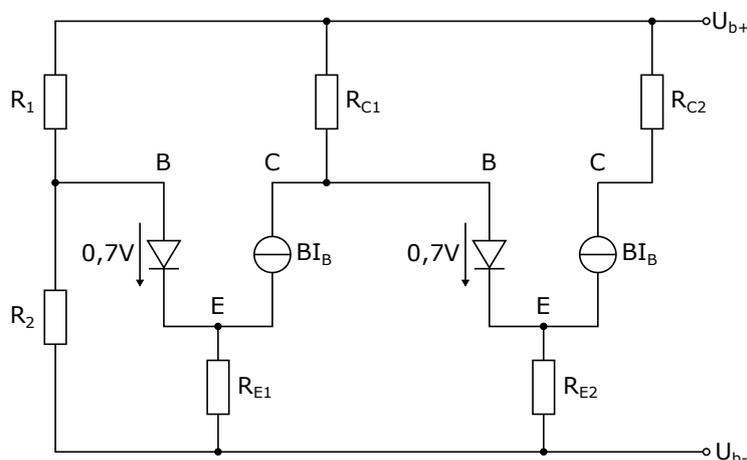


Abbildung 15

- c) Für den Transistor 1 ergeben sich folgende Werte für den Arbeitspunkt:

$$U_{R2} = U_{\text{bges}} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 18 \text{ V} \frac{3 \text{ k}\Omega}{(3 + 15) \text{ k}\Omega} = 3 \text{ V}$$

$$U_{RE1} = U_{R2} - 0,7 \text{ V} = 2,3 \text{ V}$$

$$I_{E1} = \frac{2,3 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = 2,3 \text{ mA} \approx I_{C1}$$

$$U_{CE1} = 18 \text{ V} - 2,3 \text{ V} - R_{C1} \cdot I_{C1} = 4,89 \text{ V}$$

$$S_1 = \frac{I_{C1,A}}{U_T} = 88,5 \text{ mS}$$

- d) Für den Transistor 2 ergeben sich folgende Werte für den Arbeitspunkt:

$$U_B = U_{CE1} + U_{RE1} = 4,89 \text{ V} + 2,3 \text{ V} = 7,19 \text{ V}$$

$$U_{RE2} = U_B - 0,7 \text{ V} = 6,49 \text{ V}$$

$$I_{E2} = \frac{6,49 \text{ V}}{2 \text{ k}\Omega} = 3,245 \text{ mA} \approx I_{C2}$$

$$U_{CE2} = 18 \text{ V} - U_{RE2} - U_{C2} \cdot I_{C2} = 8,26 \text{ V}$$

$$S_2 = \frac{I_{C2,A}}{U_T} = 124,8 \text{ mS}$$

e) Das Kleinsignalersatzschaltbild ist in Abbildung 16 zu sehen.

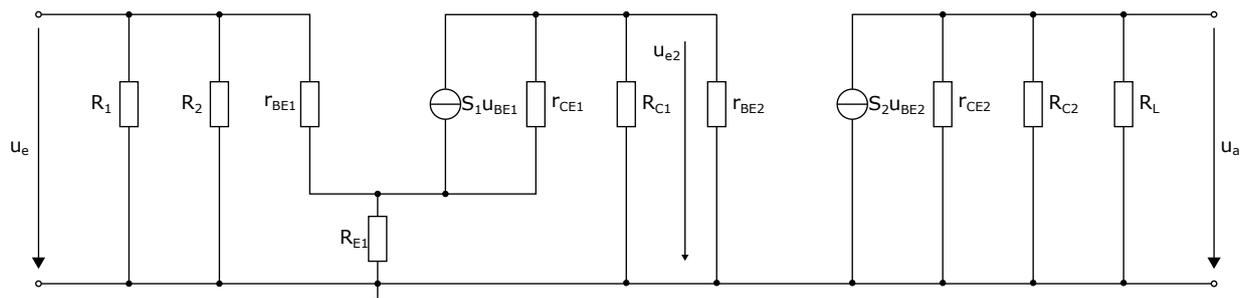


Abbildung 16

f) Der Eingangswiderstand der 2. Verstärkerstufe berechnet sich zu:

$$r_{e2} = \frac{\beta}{S_2} = \frac{400}{124,8 \text{ mS}} = 3,2 \text{ k}\Omega$$

g) Der Ausgangswiderstand der 2. Verstärkerstufe berechnet sich zu:

$$r_{a2} = R_{C2} \parallel R_L = 910 \Omega$$

h) Die Gesamtverstärkung lässt sich wie folgt berechnen: $A_g = A_1 \cdot A_2$

$$A_1 = -\frac{r_{a1}}{R_{E1}} = -\frac{R_{C1} \parallel r_{e2}}{R_{E1}} = -1,9$$

$$A_2 = -S_2 \cdot r_{a2} = -113,6$$

Daraus ergibt sich für die Gesamtverstärkung:

$$A_g = -1,9 \cdot (-113,6) = 215,8$$