

Übung 3 – Elektronische Schaltungen (ES)

Sommersemester 2020

Feldeffekttransistoren

INSTITUT FÜR HOCHFREQUENZTECHNIK UND ELEKTRONIK



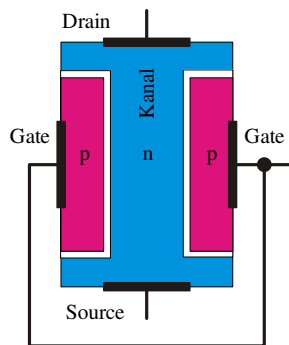
Allgemeines

- Anschlüsse: Gate, Source, Drain
- Funktionsprinzip: Die Leitfähigkeit der Drain-Source Strecke wird mit einer Steuerspannung zwischen Gate und Source beeinflusst
- Es fließt kein Steuerstrom

Vergleich

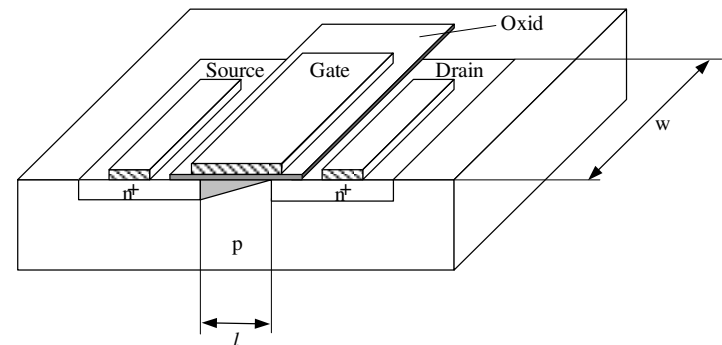
Sperrschicht-Feldeffekttransistoren (JFET)

- U_{GS} beeinflusst die Sperrschichtweite eines in Sperrrichtung betriebenen pn-Übergangs



Isolierschicht-Feldeffekttransistoren (MOSFET)

- U_{GS} beeinflusst die Ladungsträgerdichte in der unter dem Gate liegenden Inversionsschicht ($\rightarrow$ bildet leitfähigen Kanal zwischen Source und Drain)

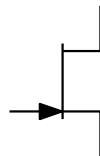


Vergleich

Sperrschicht-Feldeffekttransistoren (JFET)

- Gate ist nicht vom Kanal isoliert
→ nur negative U_{GS} , da pn-Übergang meistens in Sperrrichtung betrieben wird

- Schaltsymbol:

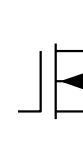


Isolierschicht-Feldeffekttransistoren (MOSFET)

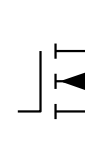
- Gate ist vom Kanal isoliert
→ positive und negative U_{GS} möglich, ohne dass ein Strom fließt

- Schaltsymbol:

Selbstleitend

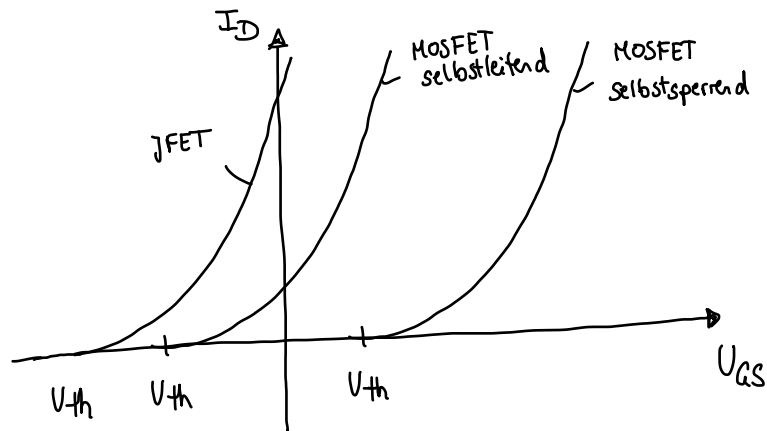


Selbstsperrend



Kennlinien

Übertragungskennlinie

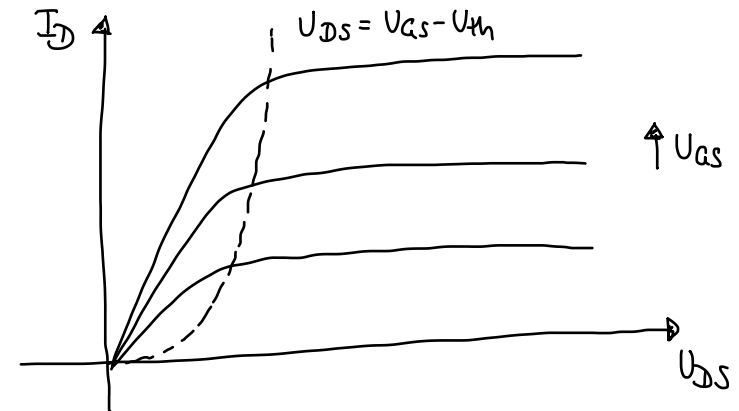


$$I_D = I_{D0} \cdot \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{th}}\right)^2$$

$$U_{GS} = 0V \rightarrow I_D = I_{D0} \text{ (Sättigungsstrom)}$$

$$U_{GS} = U_{th} \rightarrow I_D = 0$$

Ausgangskennlinienfeld



Ohmscher Bereich

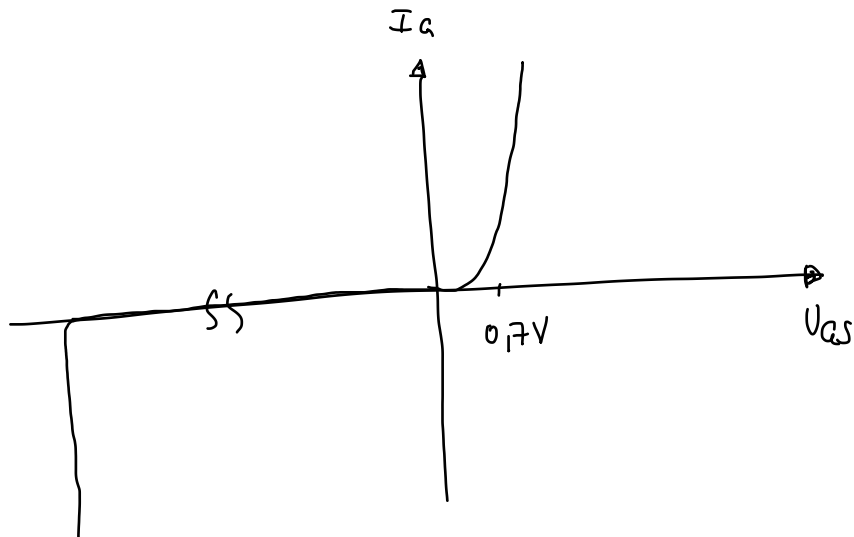
$$U_{DS} < U_{GS} - U_{th}$$

Sättigungsbereich

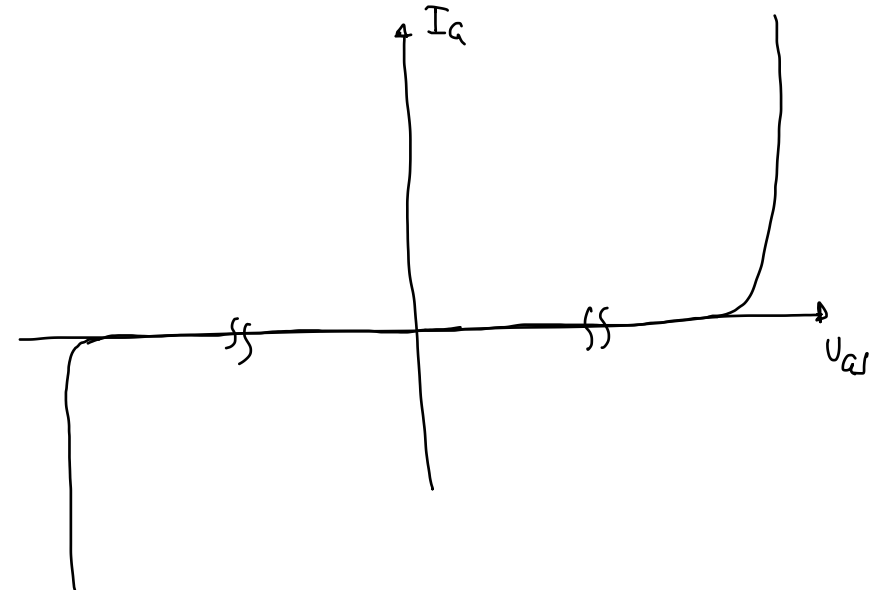
$$U_{DS} > U_{GS} - U_{th}$$

Exkurs: Eingangskennlinie

JFET



MOSFET



Großsignalverhalten – ohne Early Effekt

■ Drainstrom

$$I_D = \begin{cases} 0 & \rightarrow \text{Sperrbereich} \\ \beta \left[(U_{GS} - U_{th}) U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2} \right] & \rightarrow \text{Ohmscher Bereich} \\ \frac{\beta}{2} (U_{GS} - U_{th})^2 & \rightarrow \text{Sättigungsbereich} \end{cases}$$

Mit Steilheitskoeffizient (Maß für die Steigung der Übertragungskennlinie)
für MOSFET: Darstellung mit geometrischen Größen:

$$\beta = \mu_n C'_{ox} \frac{w}{l}$$

für JFET und selbstleitende MOSFETs: alternative Darstellung

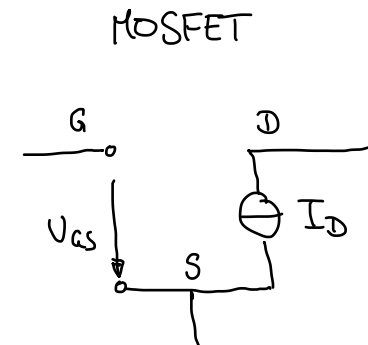
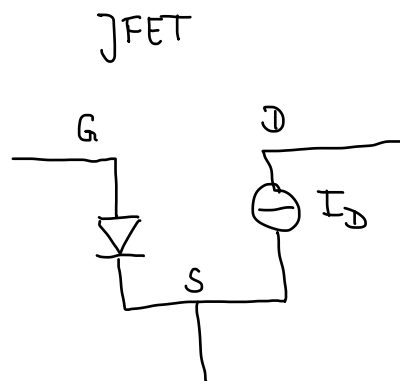
$$\beta = 2 \cdot \frac{I_{D0}}{U_{th}^2}$$

Großsignalverhalten – ohne Early Effekt

Gatestrom

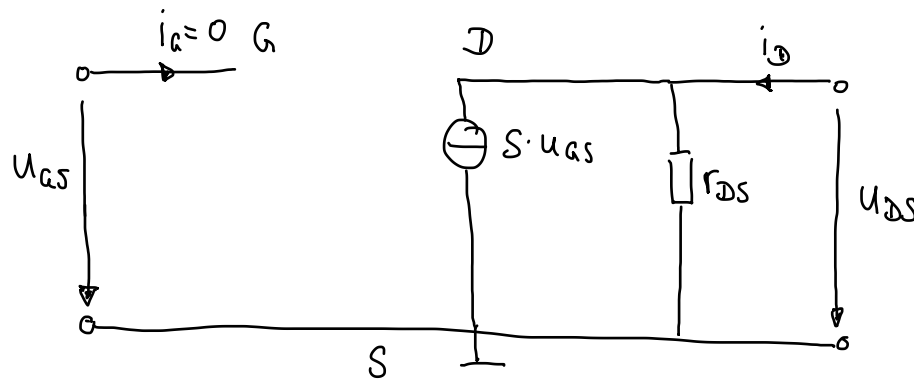
$$I_G = \begin{cases} 0 & \rightarrow \text{Mosfet} \\ I_{G,S} \left(e^{\frac{U_{GS}}{U_T}} - 1 \right) & \rightarrow \text{JFET} \end{cases}$$

Großsignalersatzschaltbild



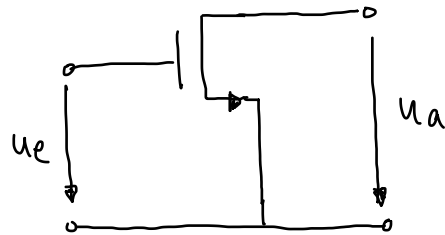
Kleinsignalersatzschaltbild

JFET & MOSFET

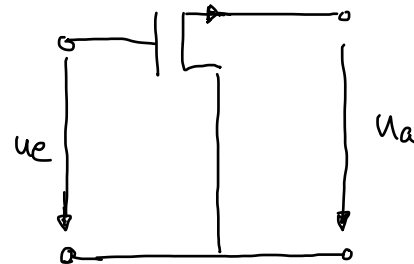


Grundsaltungen

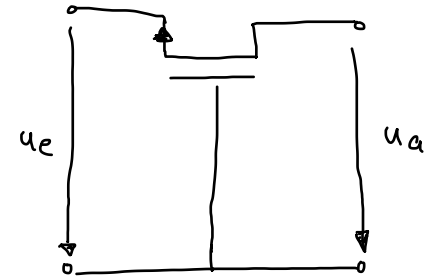
Source Schaltung



Drain Schaltung



Gate Schaltung



Vergleich

Bipolartransistor

- $I_B \neq 0$
- $I_C \sim e^{\frac{U_{BE}}{U_T}}$
→ Höhere Verstärkung/Steilheit
- Vertikales Bauelement

FET

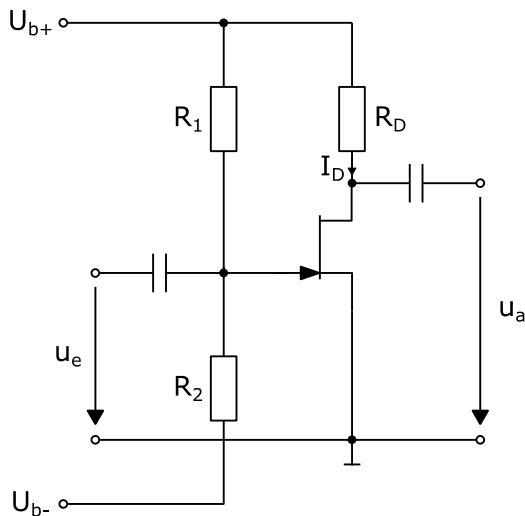
- $I_G = 0$
→ Leistungslose Steuerung
- $I_D \sim U_{GS}^2$
- Lineareres Verhalten
→ Kleinsignalverhalten für
größere Aussteuerungen gültig
- Horizontales Bauelement

Englische Terminologie

- Transconductance $g_m \triangleq$ Steilheit S
- Common Source/Gate/Drain resp. Emitter/Base/Collector $\triangleq$ Source/Gate/Drain-Schaltung bzw. Emitter/Basis/Kollektor-Schaltung
- Source/Emitter Degeneration $\triangleq$ Source-/Emitterschaltung mit Stromgegenkopplung

Aufgabe 1

■ a) ges.: Grundsaltung, Transistortyp

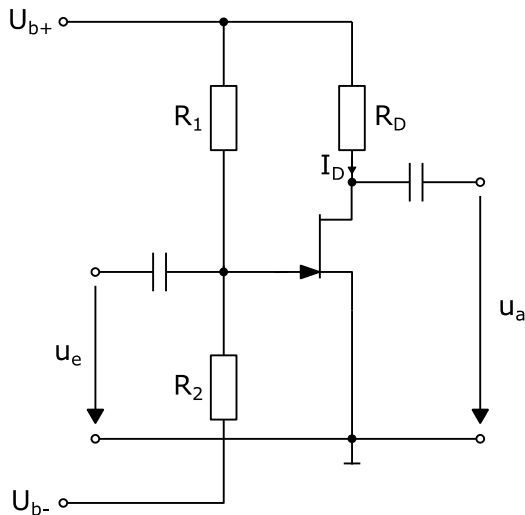


- Source schaltung
- n-Kanal JFET

$$\begin{aligned}
 U_{GS} &= 0 \text{ V} \\
 I_{D0} &= 10 \text{ mA} \\
 U_{th} &= -7 \text{ V} \\
 U_{b+} &= 12 \text{ V} \\
 U_{b-} &= -12 \text{ V} \\
 R_1 &= 1,2 \text{ M}\Omega \\
 R_2 &= 0,82 \text{ M}\Omega \\
 R_D &= 1,5 \text{ k}\Omega
 \end{aligned}$$

Aufgabe 1

■ b) ges.: Aufgabe von R_1 und R_2

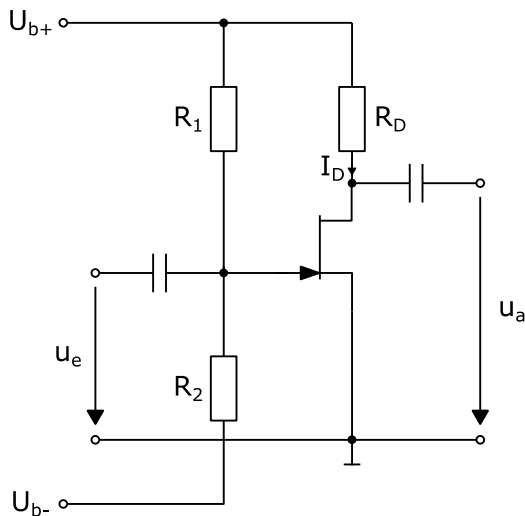


• Arbeitspunkteinstellung

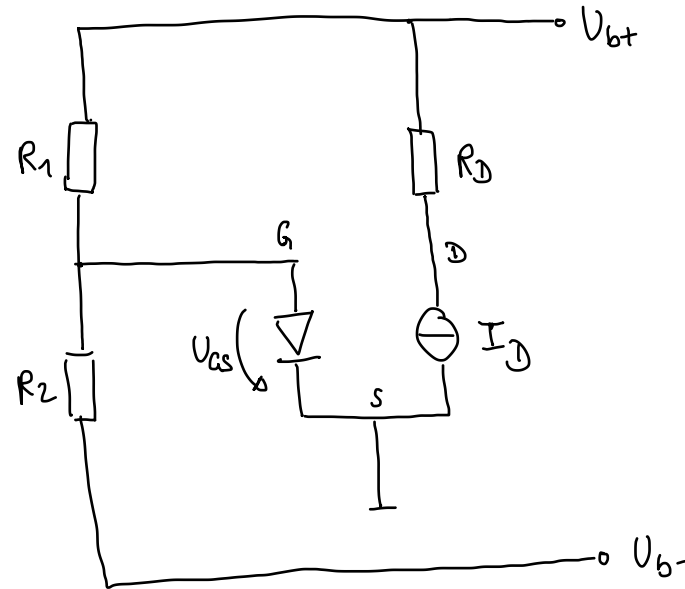
$$\begin{aligned}
 U_{GS} &= 0 \text{ V} \\
 I_{D0} &= 10 \text{ mA} \\
 U_{th} &= -7 \text{ V} \\
 U_{b+} &= 12 \text{ V} \\
 U_{b-} &= -12 \text{ V} \\
 R_1 &= 1,2 \text{ M}\Omega \\
 R_2 &= 0,82 \text{ M}\Omega \\
 R_D &= 1,5 \text{ k}\Omega
 \end{aligned}$$

Aufgabe 1

■ c) ges.: Großsignalersatzschaltbild

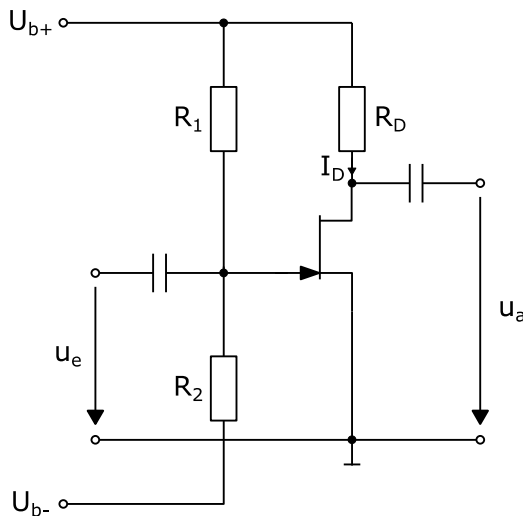


$$\begin{aligned}
 U_{GS} &= 0 \text{ V} \\
 I_{D0} &= 10 \text{ mA} \\
 U_{th} &= -7 \text{ V} \\
 U_{b+} &= 12 \text{ V} \\
 U_{b-} &= -12 \text{ V} \\
 R_1 &= 1,2 \text{ M}\Omega \\
 R_2 &= 0,82 \text{ M}\Omega \\
 R_D &= 1,5 \text{ k}\Omega
 \end{aligned}$$



Aufgabe 1

■ d) ges.: Arbeitspunkt



$$\begin{aligned}
 U_{GS} &= 0 \text{ V} \\
 I_{D0} &= 10 \text{ mA} \\
 U_{th} &= -7 \text{ V} \\
 U_{b+} &= 12 \text{ V} \\
 U_{b-} &= -12 \text{ V} \\
 R_1 &= 1,2 \text{ M}\Omega \\
 R_2 &= 0,82 \text{ M}\Omega \\
 R_D &= 1,5 \text{ k}\Omega
 \end{aligned}$$

1. U_{GS}

$$U_{GS} = U_{R2} + U_{b-}$$

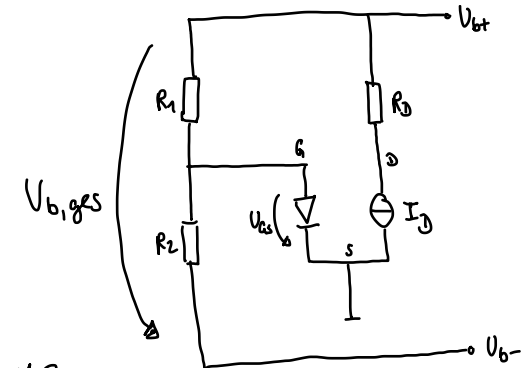
$$\begin{aligned}
 \text{mit } U_{R2} &= U_{b_{\text{iges}}} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \\
 &= 12 \text{ V} - (-12 \text{ V}) \cdot \frac{0,82 \text{ M}\Omega}{(2 + 0,82) \text{ M}\Omega} \\
 &= 9,74 \text{ V}
 \end{aligned}$$

$$U_{GS} = 9,74 \text{ V} + (-12 \text{ V}) = -2,26 \text{ V}$$

2. I_D

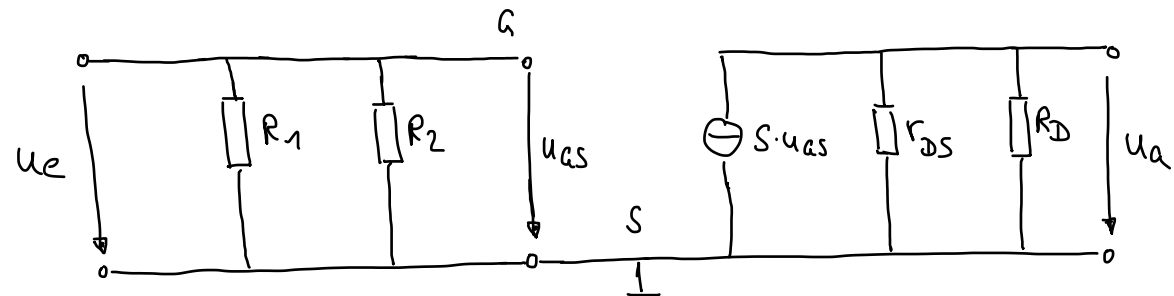
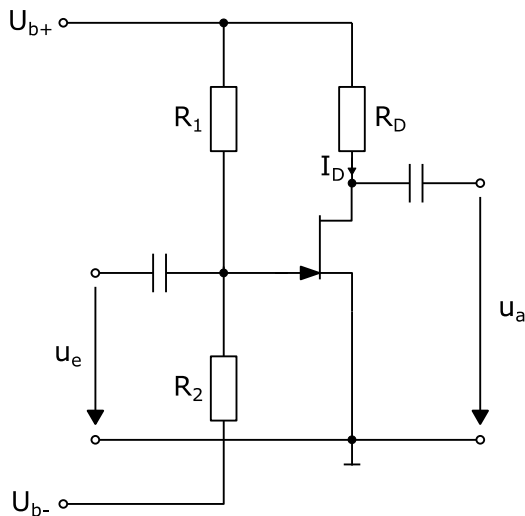
$$\begin{aligned}
 I_D &= \frac{I_{D0}}{U_{th}^2} \cdot (U_{GS} - U_{th})^2 = \frac{10 \text{ mA}}{(-7 \text{ V})^2} \cdot (-2,26 \text{ V} - (-7 \text{ V}))^2 \\
 &= 4,6 \text{ mA}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 3. \quad U_{DS} &= U_{b+} - \underbrace{(U_{RD})}_{U_{RD} = I_D \cdot R_D} \\
 &= 12 \text{ V} - 4,6 \text{ mA} \cdot 1,5 \text{ k}\Omega = 5,1 \text{ V} //
 \end{aligned}$$



Aufgabe 1

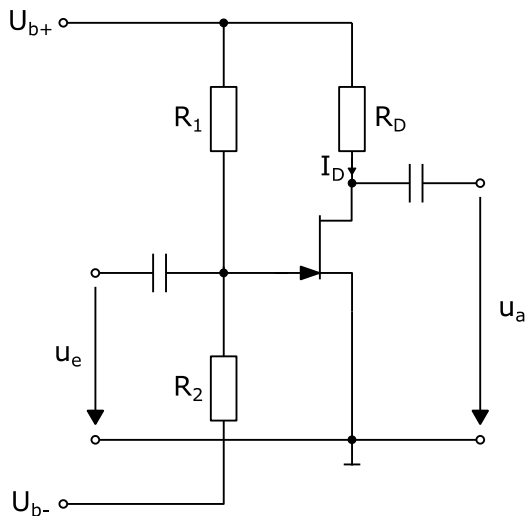
■ e) ges.: Kleinsignalersatzschaltbild



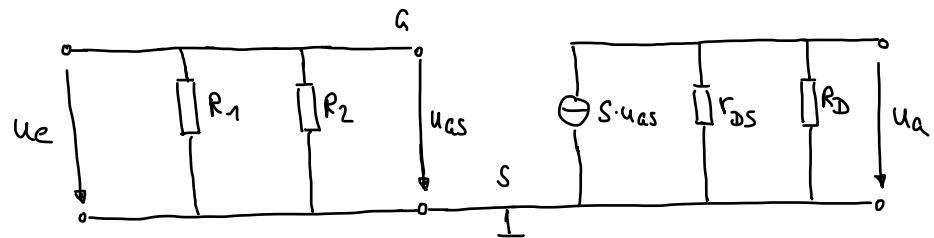
$$\begin{aligned}
 U_{GS} &= 0 \text{ V} \\
 I_{D0} &= 10 \text{ mA} \\
 U_{th} &= -7 \text{ V} \\
 U_{b+} &= 12 \text{ V} \\
 U_{b-} &= -12 \text{ V} \\
 R_1 &= 1,2 \text{ M}\Omega \\
 R_2 &= 0,82 \text{ M}\Omega \\
 R_D &= 1,5 \text{ k}\Omega
 \end{aligned}$$

Aufgabe 1

■ f) ges.: r_e



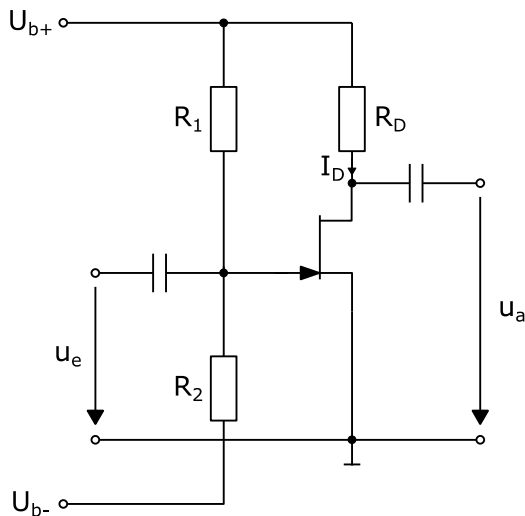
$$\begin{aligned}
 U_{GS} &= 0 \text{ V} \\
 I_{D0} &= 10 \text{ mA} \\
 U_{th} &= -7 \text{ V} \\
 U_{b+} &= 12 \text{ V} \\
 U_{b-} &= -12 \text{ V} \\
 R_1 &= 1,2 \text{ M}\Omega \\
 R_2 &= 0,82 \text{ M}\Omega \\
 R_D &= 1,5 \text{ k}\Omega
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 r_e &= \frac{u_e}{i_e} = R_1 \parallel R_2 = \frac{1,2 \text{ M}\Omega \cdot 0,82 \text{ M}\Omega}{(1,2 + 0,82) \text{ M}\Omega} \\
 &= 487 \text{ k}\Omega //
 \end{aligned}$$

Aufgabe 1

■ g) ges.: S, A



$$\begin{aligned}
 U_{GS} &= 0 \text{ V} \\
 I_{D0} &= 10 \text{ mA} \\
 U_{th} &= -7 \text{ V} \\
 U_{b+} &= 12 \text{ V} \\
 U_{b-} &= -12 \text{ V} \\
 R_1 &= 1,2 \text{ M}\Omega \\
 R_2 &= 0,82 \text{ M}\Omega \\
 R_D &= 1,5 \text{ k}\Omega
 \end{aligned}$$

$$S = \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}}$$

$$I_D = \frac{I_{D0}}{U_{th}^2} \cdot (U_{GS} - U_{th})^2$$

$$= 2 \cdot \frac{I_{D0}}{U_{th}^2} (U_{GS} - U_{th})$$

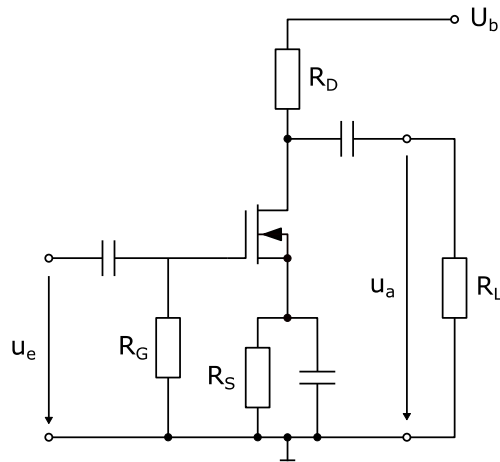
$$= 1,94 \text{ mS}$$

$$A = \frac{u_a}{u_e} = -S \cdot r_a = -S \cdot r_{DS} \parallel R_D = -S \cdot R_D$$

$$= -1,94 \text{ mS} \cdot 1,5 \text{ k}\Omega = -2,91 //$$

Aufgabe 2

■ a) ges.: Grundsaltung, Transistortyp

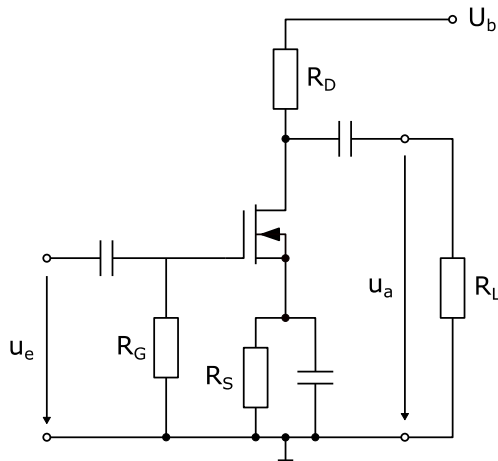


Sourceschaltung mit Gleichstromgegenkopplung

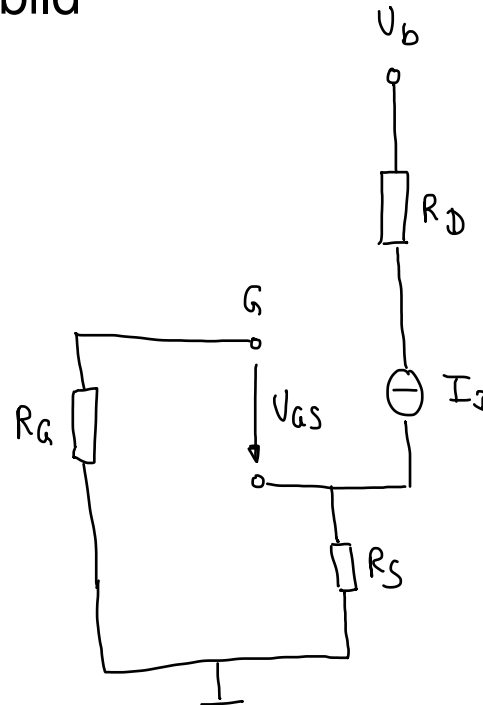
$$\begin{aligned}
 U_{GS} &= 0 \text{ V} \\
 I_{D0} &= 8 \text{ mA} \\
 U_{th} &= -2 \text{ V} \\
 U_b &= 15 \text{ V} \\
 R_S &= 500 \, \Omega \\
 R_D &= 2,7 \text{ k}\Omega \\
 R_L &= 10 \text{ k}\Omega
 \end{aligned}$$

Aufgabe 2

■ b) ges.: Großsignalersatzschaltbild

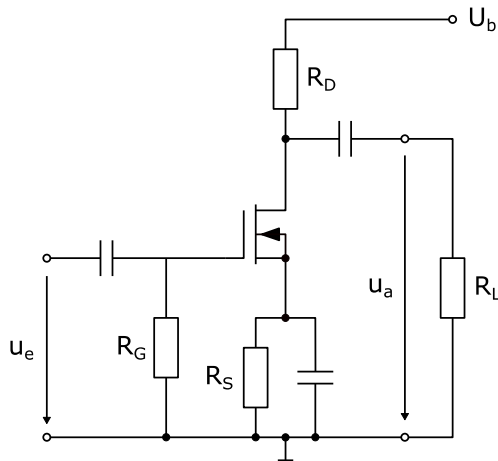


$$\begin{aligned}
 U_{GS} &= 0 \text{ V} \\
 I_{D0} &= 8 \text{ mA} \\
 U_{th} &= -2 \text{ V} \\
 U_b &= 15 \text{ V} \\
 R_S &= 500 \Omega \\
 R_D &= 2,7 \text{ k}\Omega \\
 R_L &= 10 \text{ k}\Omega
 \end{aligned}$$



Aufgabe 2

■ c) ges.: U_{GS} , U_{DS} mit $I_D = 2 \text{ mA}$



$$\begin{aligned} U_{GS} &= 0 \text{ V} \\ I_{D0} &= 8 \text{ mA} \\ U_{th} &= -2 \text{ V} \\ U_b &= 15 \text{ V} \\ R_S &= 500 \Omega \\ R_D &= 2,7 \text{ k}\Omega \\ R_L &= 10 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

1. U_{GS}

$$U_{GS} = -U_{RS}$$

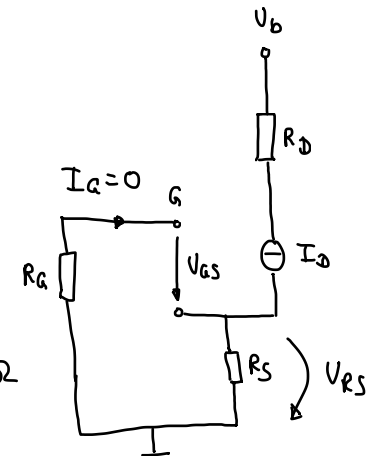
$$\text{mit } I_D = I_S \rightarrow U_{RS} = I_D \cdot R_S = 2 \text{ mA} \cdot 500 \Omega = 1 \text{ V}$$

$$U_{GS} = -1 \text{ V} //$$

2. U_{DS}

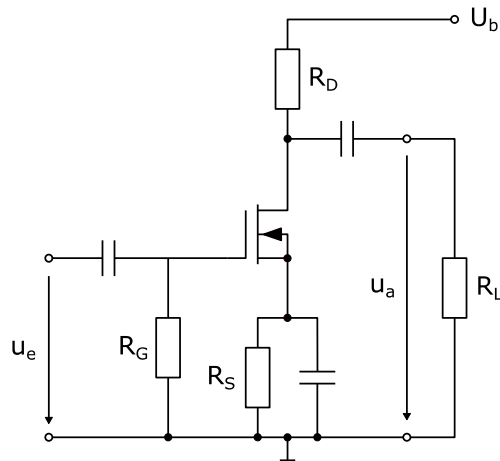
$$U_b = I_D \cdot R_D + U_{DS} + I_D \cdot R_S$$

$$\hookrightarrow U_{DS} = U_b - I_D (R_D + R_S) = 8,6 \text{ V} //$$

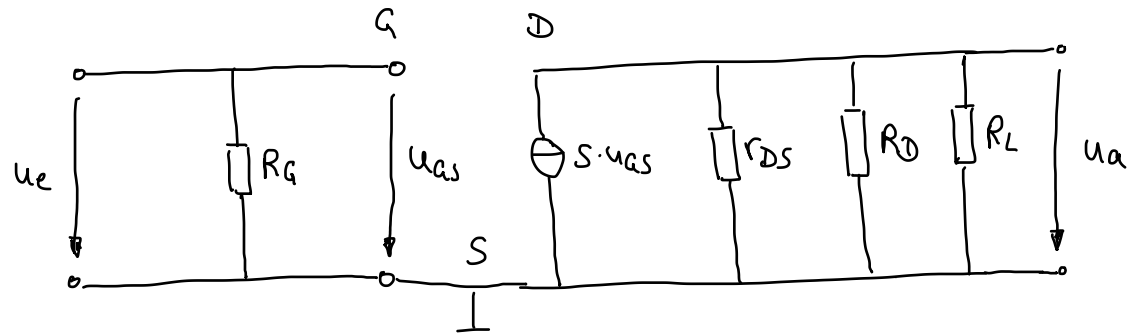


Aufgabe 2

■ d) ges.: Kleinsignalersatzschaltbild

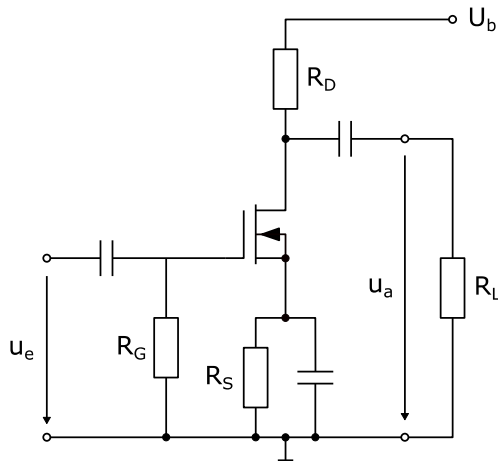


$$\begin{aligned}
 U_{GS} &= 0 \text{ V} \\
 I_{D0} &= 8 \text{ mA} \\
 U_{th} &= -2 \text{ V} \\
 U_b &= 15 \text{ V} \\
 R_S &= 500 \Omega \\
 R_D &= 2,7 \text{ k}\Omega \\
 R_L &= 10 \text{ k}\Omega
 \end{aligned}$$



Aufgabe 2

■ e) ges.: S

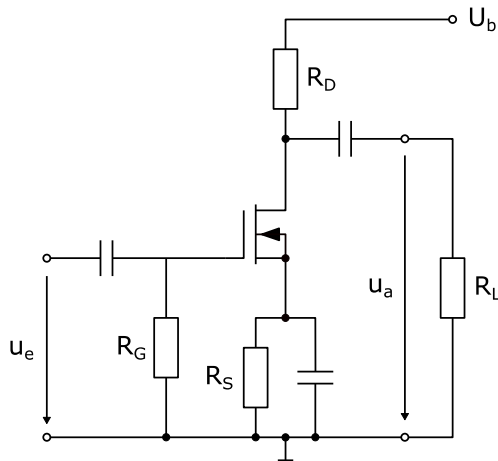


$$\begin{aligned}
 U_{GS} &= 0 \text{ V} \\
 I_{D0} &= 8 \text{ mA} \\
 U_{th} &= -2 \text{ V} \\
 U_b &= 15 \text{ V} \\
 R_S &= 500 \, \Omega \\
 R_D &= 2,7 \text{ k}\Omega \\
 R_L &= 10 \text{ k}\Omega
 \end{aligned}$$

$$S = 2 \cdot \frac{I_{D0}}{U_{th}^2} \cdot (U_{GS} - U_{th}) = 4 \text{ mS} //$$

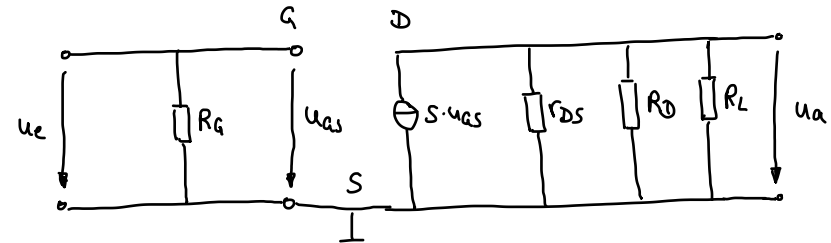
Aufgabe 2

■ f) ges.: A für 1) $R_L = \infty$, 2) $R_L = 10 \text{ k}\Omega$



$$\begin{aligned}
 U_{GS} &= 0 \text{ V} \\
 I_{D0} &= 8 \text{ mA} \\
 U_{th} &= -2 \text{ V} \\
 U_b &= 15 \text{ V} \\
 R_S &= 500 \Omega \\
 R_D &= 2,7 \text{ k}\Omega \\
 R_L &= 10 \text{ k}\Omega
 \end{aligned}$$

$$A = -S \cdot r_a$$



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

1) $R_L = \infty$

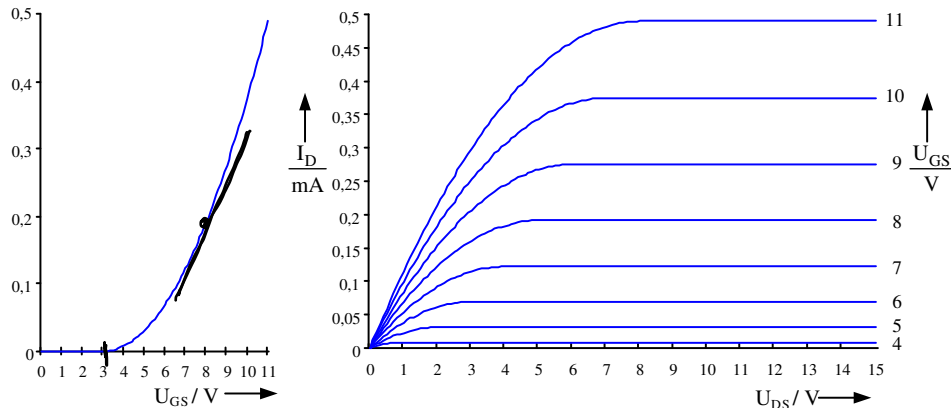
$$r_a = R_D = 2,7 \text{ k}\Omega \rightarrow A = -10,8$$

2) $R_L = 10 \text{ k}\Omega$

$$r_a = R_D \parallel R_L = 2,125 \text{ k}\Omega \rightarrow A = -8,5$$

CMOS (hier: selbstsperrende MOSFETs)

n-Kanal



$$U_{GS} > 0, U_{th} > 0, U_{DS} > 0$$

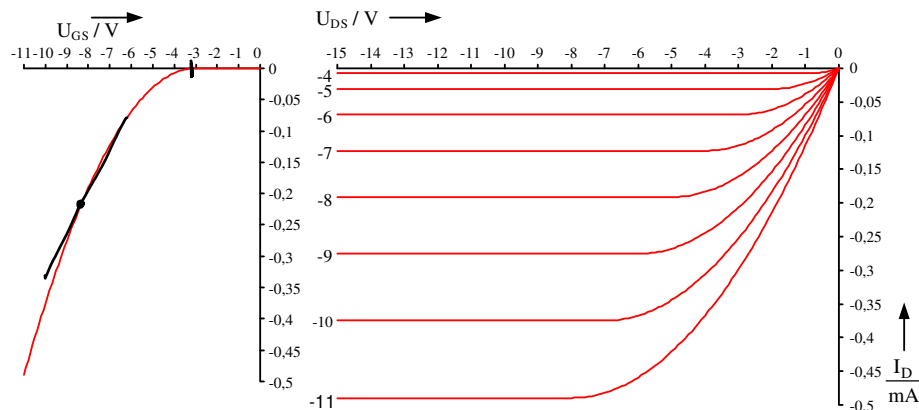
$$I_{D,n} = \frac{1}{2} \beta \underbrace{(U_{GS} - U_{th})^2}_{>0} \underbrace{\left(1 + \frac{U_{DS}}{|U_A|}\right)}_{>0}$$

$$I_{D,n} > 0$$

$$S_n = \frac{\partial I_{D,n}}{\partial U_{GS}} = \beta \underbrace{(U_{GS} - U_{th})}_{>0} \underbrace{\left(1 + \frac{U_{DS}}{|U_A|}\right)}_{>0}$$

$$S_n > 0$$

p-Kanal



$$U_{GS} < 0, U_{th} < 0, U_{DS} < 0$$

$$I_{D,p} = \ominus \frac{1}{2} \beta \underbrace{(U_{GS} - U_{th})^2}_{>0} \underbrace{\left(1 - \frac{U_{DS}}{|U_A|}\right)}_{>0}$$

$$I_{D,p} < 0 \quad I_{D,p} = -I_{D,n}$$

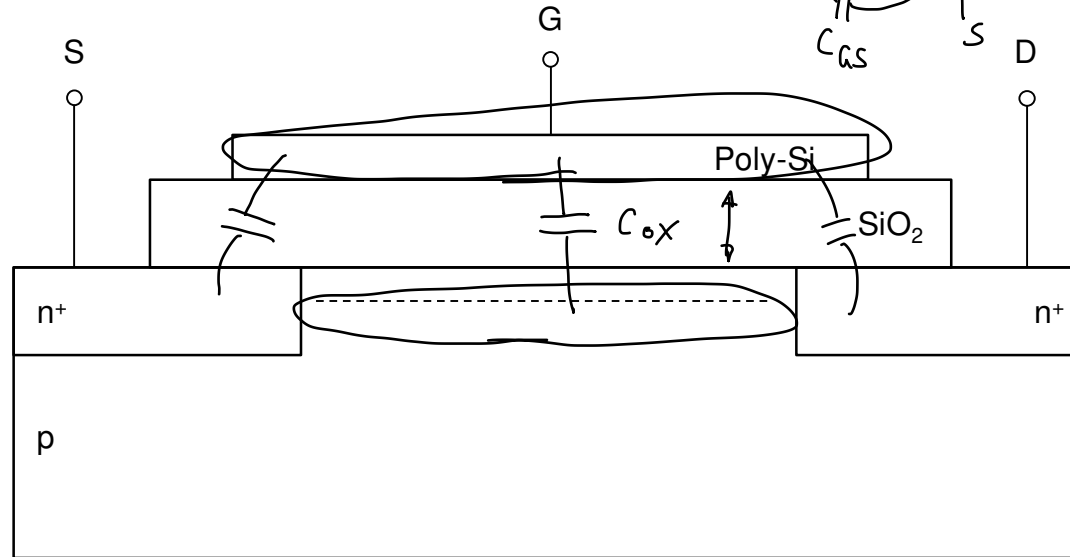
$$S_p = \frac{\partial I_{D,p}}{\partial U_{GS}} = \ominus \beta \underbrace{(U_{GS} - U_{th})}_{<0} \underbrace{\left(1 - \frac{U_{DS}}{|U_A|}\right)}_{>0}$$

$$S_p > 0$$

$$S_n = S_p$$

Quelle: ES Skript

Parasitäre Kapazitäten

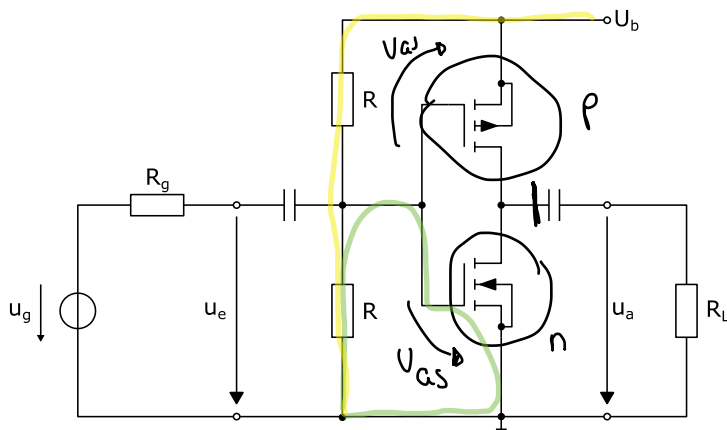


$$C_{gs} = C_{ox}' \cdot w \cdot l = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{ox}}{t_{ox}} \cdot w \cdot l = \epsilon_0 \cdot \epsilon_{ox} \cdot \frac{w \cdot l}{t_{ox}}$$

Quelle: in Anlehnung an Halbleiter-Schaltungstechnik, U. Tietze und C. Schenk

Aufgabe 3

■ a) ges.: Arbeitspunkt $\rightarrow U_{GS}, U_{DS}, I_D$



$$1. U_{GS}: U_{GS,n} = U_R$$

$$U_R = U_b \cdot \frac{R}{R+R} = \frac{U_b}{2} = 6V$$

$$U_{GS,n} = 6V \quad U_{GS,p} = -6V$$

$$\rightarrow |U_{GS}| = 6V$$

$$2. U_{DS}: |U_{DS}| = 6V$$

$$3. I_{D,n} = \frac{1}{2} \cdot \beta (U_{GS} - U_{th})^2 \left(1 + \frac{U_{DS}}{|U_{A1}|}\right)$$

$$= 0,5 \frac{mA}{V^2} \cdot (6V - 2V)^2 \left(1 + \frac{6V}{1400V}\right)$$

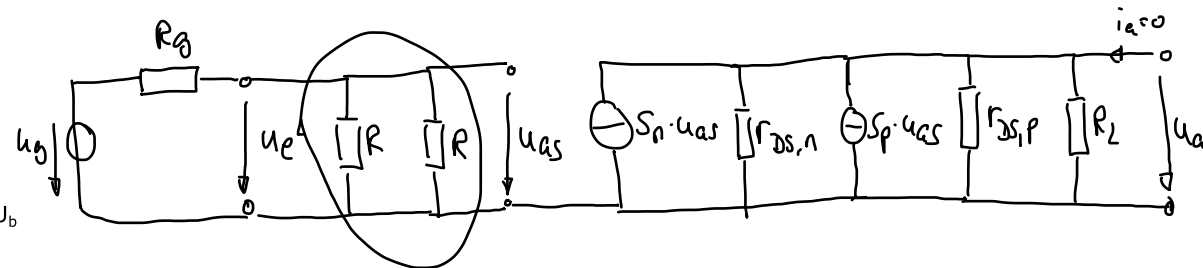
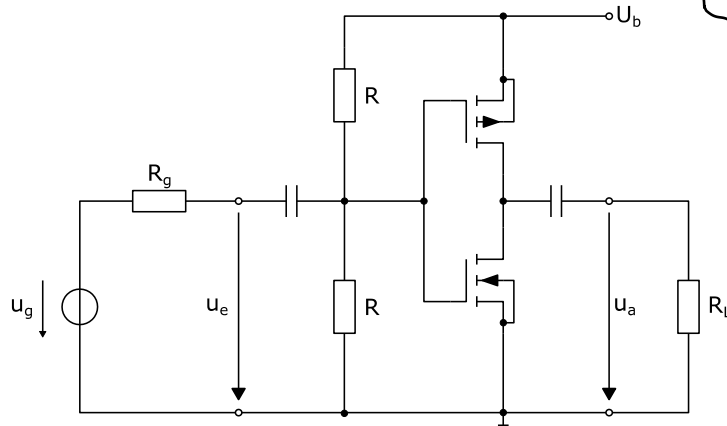
$$= 8,12 mA$$

$$I_{D,p} = -8,12 mA$$

$$|I_D| = 8,12 mA$$

Aufgabe 3

■ b) ges.: r_e, u_e

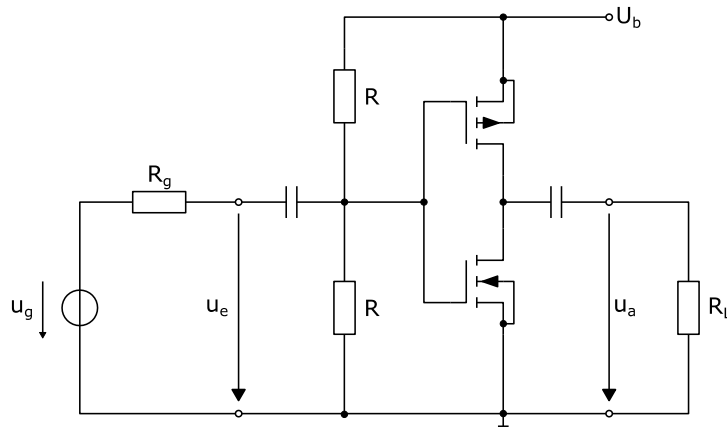


$$r_e = R \parallel R = \frac{R}{2} = 5 \text{ M}\Omega$$

$$u_e = u_g \cdot \frac{r_e}{R_g + r_e} = 0,03 \text{ V} \cdot \frac{5 \text{ M}\Omega}{5 \text{ M}\Omega + 1 \text{ M}\Omega} = 0,025 \text{ V}$$

Aufgabe 3

■ c) ges.: S, A



$$S = \beta \cdot (U_{as} - U_{th}) \cdot \left(1 + \frac{U_{DS}}{|U_{A1}|}\right)$$

$$= 1 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} \cdot (6\text{V} - 2\text{V}) \cdot \left(1 + \frac{6\text{V}}{(400\text{V})}\right) = 4,06 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$A = \frac{u_a}{u_e} = - \frac{u_{as} \cdot (S_n + S_p) \cdot (r_{DSn} \parallel r_{DSp} \parallel R_L)}{u_e}$$

$$\begin{aligned} u_{as} &\approx u_e \\ S_n &= S_p = S \\ r_{DSn} &= r_{DSp} = r_{DS} \end{aligned}$$

$$\frac{u_e \cdot 2S \cdot (r_{DSn} \parallel r_{DSp} \parallel R_L)}{u_e}$$

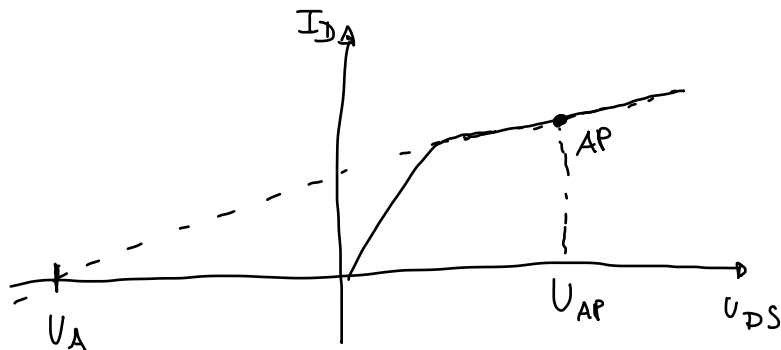
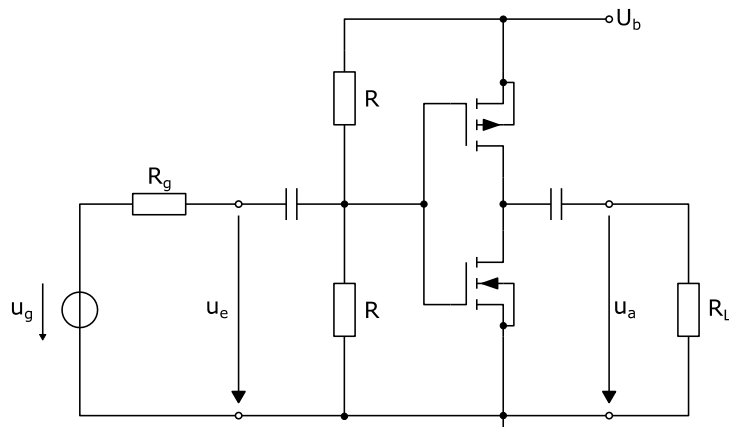
$$= -2S \cdot \left(\frac{r_{DS}}{2} \parallel R_L\right)$$

$$r_a = 7,14 \text{ k}\Omega$$

$$A = -58 //$$

Aufgabe 3

■ c) ges.: S, A



r_{DS} :

1. Variante:

$$r_{DS} = \frac{\Delta U_{DS}}{\Delta I_D}$$

$$\text{für } U_{DS} = 12V \rightarrow I_D = \frac{1}{2} \beta (U_{GS} - U_{th})^2 \cdot \left(1 + \frac{U_{DS}}{|U_A|}\right) = 8,24 \text{ mA}$$

$$U_{DS} = 6V \rightarrow I_D = 8,12 \text{ mA}$$

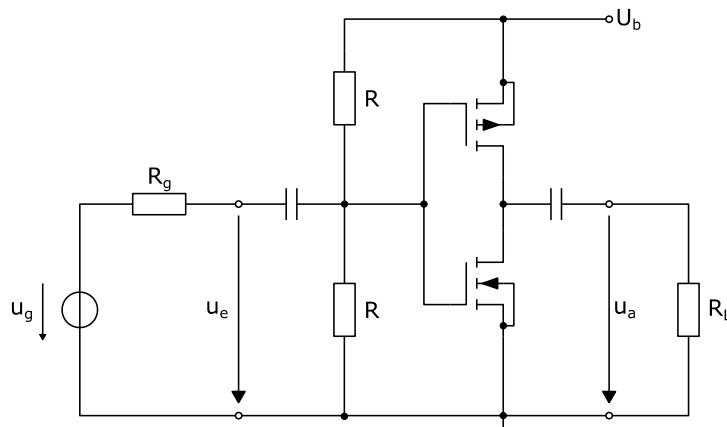
$$r_{DS} = \frac{U_{DS,2} - U_{DS,1}}{I_{D,2} - I_{D,1}} = \frac{12V - 6V}{8,24 \text{ mA} - 8,12 \text{ mA}} = 50 \text{ k}\Omega //$$

2. Variante:

$$r_{DS} = \frac{U_{AP} - U_A}{I_{D,AP}} = \frac{6V - (-400V)}{8,12 \text{ mA}} = 50 \text{ k}\Omega //$$

Aufgabe 3

■ d) ges.: C_{GSn} , C_{GSp} , C_{ein}



$$C_{GS} = C_{ox} = C_{ox}' \cdot w \cdot l = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{ox}}{t_{ox}} \cdot w_n \cdot l$$

1. ω_p

$$\beta_n = \beta_p = \beta = \mu_n \cdot C_{ox}' \cdot \frac{w_n}{l} = \mu_p \cdot C_{ox}' \cdot \frac{w_p}{l}$$

$$\omega_p = \omega_n \cdot \frac{\mu_n}{\mu_p} = \omega_n \cdot \underbrace{\frac{1200}{400}}_{=3} = 3 \cdot \omega_n = 15 \mu m$$

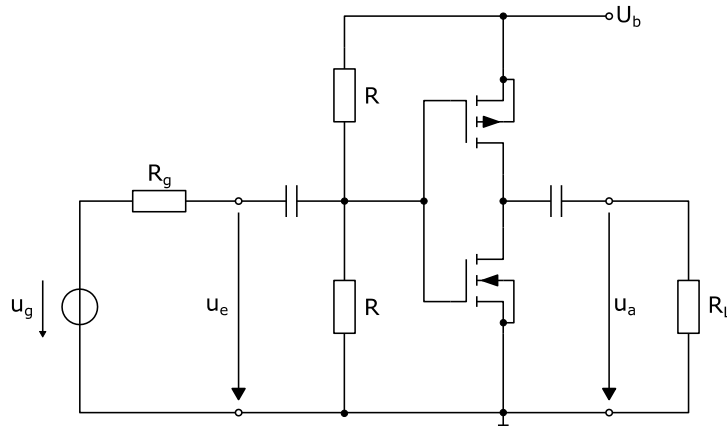
2. $C_{GSn} = 10 \text{ fF}$

$$C_{GSp} = 30 \text{ fF}$$

$$C_{ein} = C_{GSn} + C_{GSp} = 40 \text{ fF} //$$

Aufgabe 3

■ e) ges.: X_C für $f = 20 \text{ kHz}$



$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f \cdot C_{eh}} = \frac{1}{2\pi \cdot 20 \text{ kHz} \cdot 40 \text{ fF}}$$

$$= 198,94 \text{ M}\Omega$$

$$r_e = 5 \text{ M}\Omega$$