

Elektronische Schaltungen SS 2020

3. Übungsblatt - Lösung

Feldeffekttransistoren

Aufgabe 1

- a) Bei der Schaltung handelt es sich um eine Sourceschaltung und es wird ein n-Kanal Sperrschicht FET eingesetzt.
- b) Die Widerstände werden zur Arbeitspunkteinstellung benötigt.
- c) Das Großsignalersatzschaltbild ist in Abbildung 1 zu sehen.

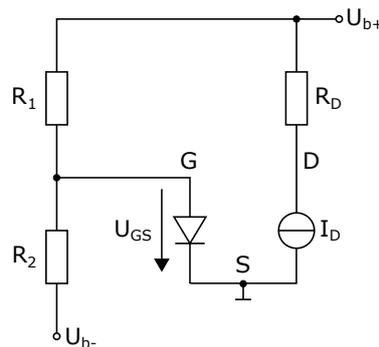


Abbildung 1

- d) Der Arbeitspunkt der Schaltung (U_{GS} , I_D) liegt im Sättigungs-(Arbeits-)Bereich des Transistors.

Berechnung von U_{GS} mit Hilfe von Abbildung 2.

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

mit Spannungsteiler: $U_{R2} = (U_{b+} - U_{b-}) \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 9,75 \text{ V}$

$$U_{GS} = 9,75 \text{ V} - 12 \text{ V} = -2,26 \text{ V}$$

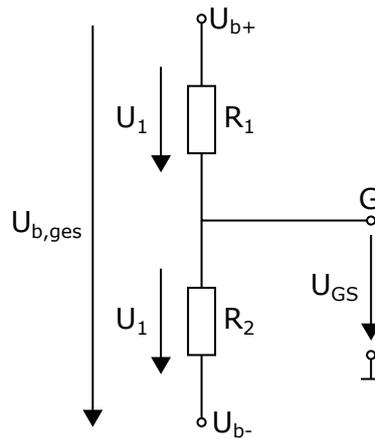


Abbildung 2

Berechnung von I_D im Sättigungsbereich:

$$I_D = \frac{I_{D0}}{U_{th}^2} (U_{GS} - U_{th})^2 = \frac{10 \text{ mA}}{49 \text{ V}^2} (-2,25 \text{ V} + 7 \text{ V})^2 = 4,6 \text{ mA}$$

Berechnung von U_{DS} :

$$U_{DS} = U_{textb,+} - U_{RD} = U_{textb,+} - R_D \cdot I_D = 5,1 \text{ V}$$

e) Das Kleinsignalersatzschaltbild ist in Abbildung 3 zu sehen.

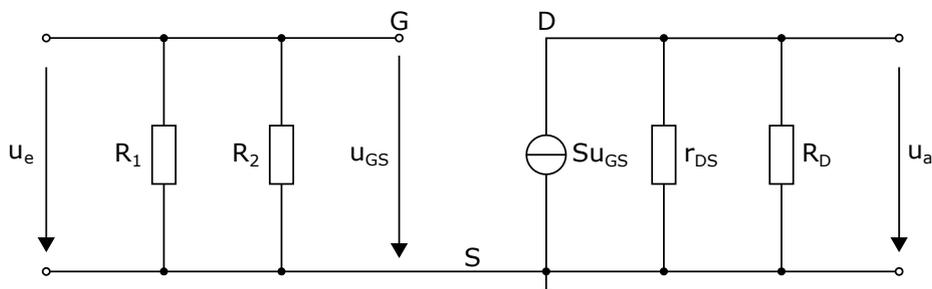


Abbildung 3

f) Der Kleinsignal-Eingangswiderstand r_e berechnet sich zu:

$$r_e = R_1 \parallel R_2 = 487 \text{ k}\Omega$$

g) Die Steilheit im Arbeitspunkt berechnet sich zu:

$$S = 2 \frac{I_{D0}}{U_{th}^2} (U_{GS} - U_{th}) = 1,94 \text{ mS}$$

Die Kleinsignal Spannungsverstärkung berechnet sich zu:

$$A = \frac{u_a}{u_e} = -S \cdot R_D = -2,91$$

Aufgabe 2

a) Großsignalverhalten: Sourceschaltung mit Stromgegenkopplung

Kleinsignalverhalten: Sourceschaltung

Transistortyp: Selbstleitender n-Kanal MOSFET

b) Das Großsignalersatzschaltbild ist in Abbildung 4 zu sehen.

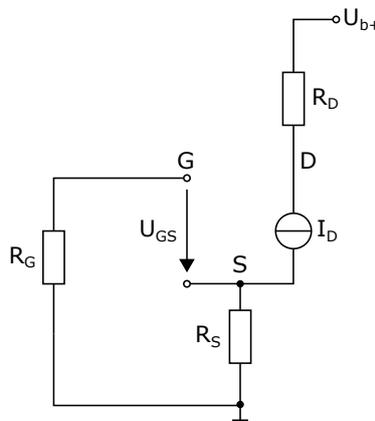


Abbildung 4

c) Berechnung von U_{GS} :

Variante 1: Allgemeine Betrachtung

Das Gate des MOSFET ist über R_G mit Masse verbunden. Da kein Strom in das Gate fließt, liegt das Gate ebenfalls auf Massepotential (siehe Abbildung 5). Daraus folgt:

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

Da $I_D = I_S$ ist, gilt:

$$U_{RS} = I_D R_S$$

Mit $R_S = 500 \Omega$ und $I_D = 2 \text{ mA}$ folgt

$$U_{GS} = -I_D R_S = -1 \text{ V}$$

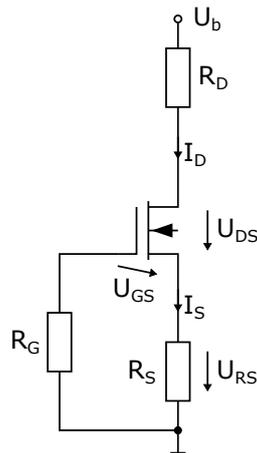


Abbildung 5

Variante 2: Berechnung über Formel für I_D :

Der Arbeitspunkt der Schaltung liegt im aktiven Bereich (Sättigungsbereich), da $U_{DS} \geq U_{GS} - U_{th}$.

Damit gilt:

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

$$\Leftrightarrow U_{GS} = \sqrt{\frac{I_D}{I_{D0}} \cdot U_{th}^2} + U_{th}$$

Problem: Lösung über quadratische Gleichung liefert 2 Ergebnisse.

Berechnung von U_{DS} :

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

$$U_{DS} = U_b - I_D \cdot R_D - I_D \cdot R_S = 8,6 \text{ V}$$

d) Das Kleinsignalersatzschaltbild ist in Abbildung 6 zu sehen.

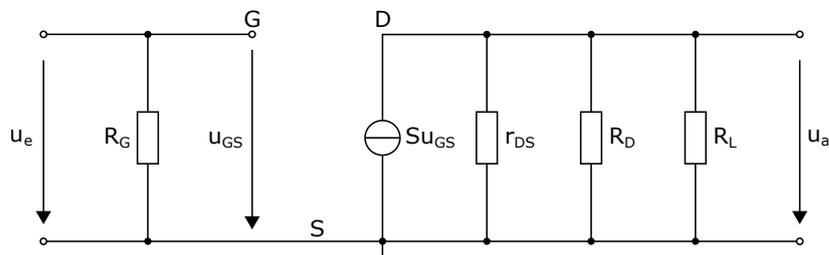


Abbildung 6

e) Die Steilheit im Arbeitspunkt berechnet sich zu

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

f) Die Kleinsignal Spannungsverstärkung berechnet sich zu

$$A = -S \cdot r_a$$

Für 1) $R_L = \infty$

$$r_a = R_D = 2,7 \text{ k}\Omega$$

$$A = -S \cdot R_D = -10,8$$

Für 2) $R_L = 10 \text{ k}\Omega$

$$r_a = R_D \parallel R_L = 2,125 \text{ k}\Omega$$

$$A = -S \cdot r_a = -8,5$$

Aufgabe 3

a) Bestimmung von U_{GS} :

Der Spannungsteiler an den Gates der beiden Transistoren ergibt:

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

Dadurch ergibt sich für U_{GS} ebenfalls $|6 \text{ V}|$.

Bestimmung von U_{DS} :

Da die Transistoren die gleichen Schwellspannungen und den gleichen Faktor β besitzen, muss dies der ideale Arbeitspunkt für analogen Betrieb sein. In diesem Fall ist auch $U_{DS} = |6 \text{ V}|$.

Bestimmung von I_D : Die Transistoren befinden sich im Sättigungsbereich (Arbeitsbereich) (da

$$U_{DS,n} \geq U_{GS,n} - U_{th,n}.$$

$$\begin{aligned} I_{D,n} &= \frac{1}{2} \beta (U_{GS} - U_{th})^2 \cdot \left(1 + \frac{U_{DS}}{U_A} \right) \\ &= 0,5 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} (6 \text{ V} - 2 \text{ V})^2 \cdot \left(1 + \frac{6 \text{ V}}{|400 \text{ V}|} \right) \\ &= 8,12 \text{ mA} \\ I_{D,p} &= -8,12 \text{ mA} \\ |I_D| &= 8,12 \text{ mA} \end{aligned}$$

b) Um den Eingangswiderstand der Schaltung zu berechnen, ist es hilfreich, das Kleinsignaler-satzschaltbild zu zeichnen (siehe Abbildung 7).

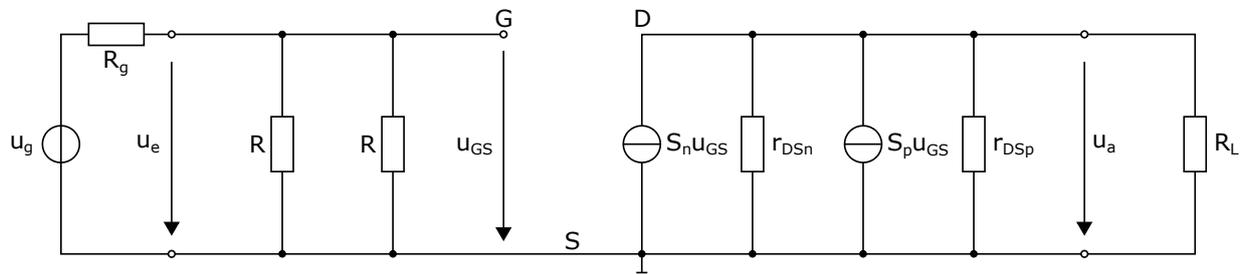


Abbildung 7

Der Eingangswiderstand ist der Widerstand, mit dem die Spannungsquelle belastet wird. Dadurch ergibt sich

$$r_e = R \parallel R = \frac{1}{2} R = 5 \text{ M}\Omega$$

Die Eingangsspannung berechnet sich zu

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

c) Berechnung der Steilheit

$$\begin{aligned} S &= \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} = \beta (U_{GS} - U_{th}) \cdot \left(1 + \frac{U_{DS}}{|U_A|} \right) \\ &= 1 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} (6 \text{ V} - 2 \text{ V}) \cdot \left(1 + \frac{6 \text{ V}}{400 \text{ V}} \right) = 4,06 \frac{\text{mA}}{\text{V}} \end{aligned}$$

Berechnung der Spannungsverstärkung

$$A = \frac{u_a}{u_e} = - \frac{(S_n \cdot u_{GS} + S_p \cdot u_{GS}) \cdot (r_{DSn} \parallel r_{DSp} \parallel R_L)}{u_e} \stackrel{\substack{u_{GS}=u_e \\ S_n=S_p=S \\ r_{DSn}=r_{DSp}=r_{DS}}}{=} - \frac{u_e(2S \cdot (r_{DSn} \parallel r_{DSp} \parallel R_L))}{u_e} = -2 \cdot S \cdot (r_{DSn} \parallel r_{DSp} \parallel R_L) = -2 \cdot S \cdot r_a$$

Um A zu berechnen muss r_a berechnet werden:

$$r_a = r_{DSn} \parallel r_{DSp} \parallel R_L$$

r_{DS} kann auf 2 verschiedenen Wegen berechnet werden:

1. Variante: Allgemein ist $r_{DS} = \frac{\Delta U_{DS}}{\Delta I_{DS}}$, der Kehrwert der Steigung der Kennlinie, auf der sich der Arbeitspunkt befindet. Wir benötigen zwei Werte für U_{DS} und I_D :

Für $U_{DS} = 12 \text{ V}$:

$$\begin{aligned} I_D &= = \frac{1}{2} \beta (U_{GS} - U_{th})^2 \cdot \left(1 + \frac{U_{DS}}{U_A} \right) \\ &= 0,5 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2} (6 \text{ V} - 2 \text{ V})^2 \cdot \left(1 + \frac{12 \text{ V}}{|400 \text{ V}|} \right) = 8,24 \text{ mA} \end{aligned}$$

Für $U_{DS} = 6 \text{ V}$ (im Arbeitspunkt) haben wir I_D zu 8,12 mA berechnet.

Daraus ergibt sich für r_{DS} :

$$r_{DS} = \frac{\Delta U_{DS}}{\Delta I_{DS}} = \frac{U_{DS2} - U_{DS,A}}{I_{D2} - I_{D,A}} = \frac{6 \text{ V}}{120 \mu\text{A}} = 50 \text{ k}\Omega$$

2. Variante: Die Summe von Early-Spannung und U_{DS} bilden und durch den Drainstrom I_D im Arbeitspunkt dividieren. (Bei der Early Spannung ist $I_D = 0$).

$$r_{DS} = \frac{|U_A| + U_{DS,A}}{I_{DS,A}} = \frac{400 \text{ V} + 6 \text{ V}}{8,12 \text{ mA}} = 50 \text{ k}\Omega$$

Daraus ergibt sich für den Kleinsignalausgangswiderstand

$$r_a = 7143 \Omega.$$

Die Spannungsverstärkung A berechnet sich damit zu

$$A = -2 \cdot S \cdot r_a = -2 \cdot 4,06 \frac{\text{mA}}{\text{V}} \cdot 7143 \frac{\text{V}}{\text{A}} = -58$$

d) Vereinfacht kann bei einem MOSFET angenommen werden, dass

$$C_{GS} = C_{ox} = C'_{ox} \cdot w \cdot l$$

Die Oxidkapazität ergibt sich durch den Plattenkondensator, der durch das Gate und dem darunterliegende Kanal gebildet wird.

Da nur w_n gegeben ist, muss zuerst noch w_p berechnet werden.

$$\begin{aligned} \beta_n = \beta_p = \beta &= \mu_n \cdot C'_{ox} \cdot \frac{w_n}{l} = \mu_p \cdot C'_{ox} \cdot \frac{w_p}{l} \\ \rightarrow w_p &= w_n \frac{\mu_n}{\mu_p} = w_n \frac{1200}{400} = 3 \cdot w_n = 15 \mu\text{m} \end{aligned}$$

Daraus ergibt sich die Gate-Source Kapazitäten der beiden Transistoren:

$$\begin{aligned} C_{GSn} &= C'_{ox} \cdot w_n \cdot l = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{ox}}{t_{ox}} \cdot w_n \cdot l = \frac{8,85 \cdot 10^{12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \cdot 4,6}{20 \cdot 10^{-9} \text{m}} = 10 \text{ fF} \\ C_{GSp} &= 30 \text{ fF} \\ C_{ein} &= C_{GSn} + C_{GSp} = 40 \text{ fF} \end{aligned}$$

e) Bisher haben wir uns nur mit dem ohmschen Eingangswiderstand einer Schaltung befasst. Hier soll nun erstmals eine Betrachtung der Eingangsimpedanz vorgenommen werden. Dazu benötigen wir den minimalen Blindwiderstand, d.h. X_C bei der oberen Grenzfrequenz.

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f C_{ein}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 20 \text{ kHz} \cdot 40 \cdot 10^{-15} \frac{\text{As}}{\text{V}}} = 198,94 \text{ M}\Omega$$

Der ohmsche Eingangswiderstand der Schaltung war $r_{ein} = 5 \text{ M}\Omega$. Er ist hier noch sehr viel kleiner, als die durch die Eingangskapazität verursachte Reaktanz und bestimmt damit wesentlich den tatsächlichen Eingangswiderstand.