

Der Sperrschicht-Feldeffekttransistor
Untersuchung des statischen Verhaltens und Anwendung als NF-Verstärker

Studiengang: KIT

Datum: 06.01.2011

Set: 3.08 Platz: 4

Teilnehmer: Michael Goldbuch, Jürgen Döfinge

21/11

Zielstellung *R_s Nennwert I_D , V_G I_D*

- Aufnahme von Ausgangs- und Steuerkennlinienfeldern in Sourceschaltung.
- Bestimmung der Steilheit S , des differentiellen Ausgangswiderstandes r_{ds} , der Abschnürspannung U_p sowie des Drain-Source-Kurzschlußstromes I_{DSS} anhand der Kennlinienfelder.
- Vergleich der experimentell ermittelten Steuerkennlinie mit dem Modell (quadratische Näherung)
- Dimensionierung und Aufbau einer NF-Verstärkerstufe in Sourceschaltung und Bestimmung der Spannungsverstärkung V_U .

1. Begriffe und Formelzeichen

Steilheit S , differentieller Ausgangswiderstand r_{ds} , Abschnürspannung U_p , Drain-Source-Kurzschlußstrom I_{DSS}

2. Versuchsvorbereitung

- 2.1. Wiederholen Sie den Vorlesungsabschnitt "Unipolare Transistoren". Machen Sie sich mit den in Punkt 1. genannten Begriffen und Formelzeichen vertraut.
- 2.2. Dimensionieren Sie die passiven Bauelemente eines Kleinsignalverstärkers mit S-FET in der Schaltung nach Bild 1.

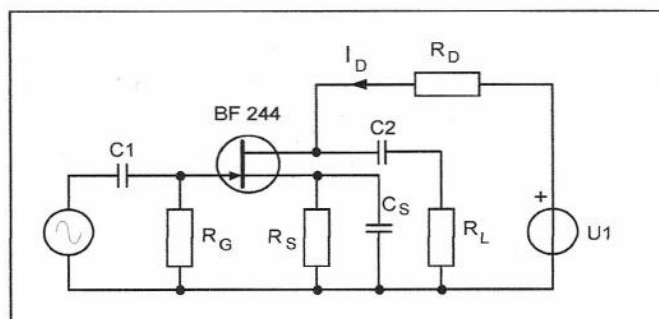


Bild 1: Kleinsignalverstärker

Gegeben sind folgende Daten:

Betriebsspannung: $U_1 = 12 \text{ V}$
 statischer Arbeitspunkt: $U_{DS} = \frac{U_1}{2} - U_{RS}$ $I_D = 2 \text{ mA}$
 Transistordaten: $U_p = -1,5 \text{ V}$ $I_{DSS} = 5 \text{ mA}$ $I_G = 5 \text{ nA}$

Innenwiderstand Generator: $R_1 = 5 \text{ k}\Omega$
 Abschlußwiderstand Last: $R_L = 50 \text{ k}\Omega$
 Frequenzbereich: $50 \text{ Hz} \leq f \leq 15 \text{ kHz}$

Legen Sie Nennwerte, Normreihe und Bauformen sowie Leistungsklassen für die Widerstände und die Spannungsfestigkeit für die Kondensatoren fest.
 Berechnen Sie die Steilheit des FETs im Arbeitspunkt und die Spannungsverstärkung V_U der Schaltung.

3. Versuchsdurchführung und -auswertung

3.1. Aufnahme von Ausgangs- und Steuerkennlinienfeld

Bauen Sie die Schaltung nach Bild 2 auf. Beachten Sie beim Schaltungsaufbau die unterschiedliche Polung der Spannungsquellen für die Gate-Source-Spannung (U_1) und Drain-Source-Spannung (U_2)!

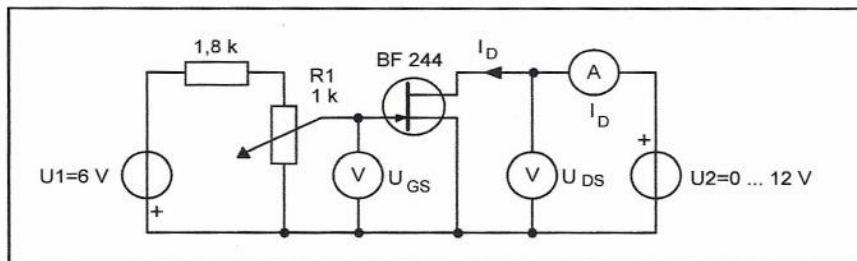


Bild 2: Schaltung zur Aufnahme der Kennlinien

Bestimmen Sie zunächst den Strom I_D bei $U_{GS} = 0 \text{ V}$ und $U_{DS} = 8 \text{ V}$. Legen Sie danach eine geeignete Teilung für die Koordinatensysteme zur Darstellung der Steuer- und Ausgangskennlinie fest, wenn die Meßwerte in den Bereichen $-2,5 \text{ V} \leq U_{GS} \leq 0 \text{ V}$ und $0 \text{ V} \leq U_{DS} \leq 12 \text{ V}$ aufgenommen werden sollen. Stellen Sie beide Kennlinien nebeneinander mit einer gemeinsamen Ordinate dar.

Entscheiden Sie anhand des ermittelten Stromes I_D , ob Maßnahmen zum Schutz des Transistors erforderlich sind, wenn dessen maximale Verlustleistung 300 mW beträgt und Meßwerte im Bereich von $0 \text{ V} \leq U_{DS} \leq 12 \text{ V}$ aufgenommen werden.

Zur Aufnahme des Ausgangskennlinienfeldes $I_D = f(U_{DS})$ bei verschiedenen Werten von $U_{GS} = \text{const.}$ ermitteln Sie 4 Kennlinien. Wählen Sie U_{GS} jeweils so, daß sich die Kennlinien möglichst gleichmäßig über den vorgegebenen Bereich des Drainstromes aufteilen. Eine der Kennlinien soll für $U_{GS} = 0 \text{ V}$ aufgenommen werden und eine weitere den Punkt $U_{DS} = 8 \text{ V}$ und $I_D = 1 \text{ mA}$ enthalten, in dem der differentielle Ausgangswiderstand r_{DS} bestimmt werden soll.

Nehmen Sie die Steuerkennlinien für $U_{DS} = 1 \text{ V}$ und $U_{DS} = 8 \text{ V}$ auf und bestimmen Sie jeweils die Abschnürspannung U_P aus der Festlegung

$$U_P = U_{GS} \quad (I_D = 1 \text{ }\mu\text{A})$$

Sollte es nicht möglich sein, den Strom $I_D = 1 \text{ }\mu\text{A}$ einzustellen, erhöhen Sie die Spannung U_1 auf 10 V .

Bestimmen Sie die Steilheit im Arbeitspunkt von $U_{DS} = 8 \text{ V}$ und $I_D = 1 \text{ mA}$. Ermitteln Sie im gleichen Arbeitspunkt im Ausgangskennlinienfeld den differentiellen Ausgangswiderstand r_{DS} .

Bestimmen Sie aus dem Ausgangskennlinienfeld grafisch den Drain-Source-Kurzschlußstrom I_{DSS} über die Definition

$$I_{DSS} = I_D \quad (U_{DS} = -U_P) \quad \text{bei } U_{GS} = 0$$

Für den nichtohmschen Bereich gilt für die Steuerkennlinie die Näherung:

$$I_D \approx I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P} \right)^2 \quad /1/$$

Berechnen Sie die Steuerkennlinie nach diesem Ansatz und vergleichen Sie diese mit Ihren Meßwerten.

3.2. Dimensionierung und Aufbau einer NF-Verstärkerstufe in Sourceschaltung

Dimensionieren Sie die passiven Bauelemente der Schaltung nach Bild 3, wenn der statische Arbeitspunkt des Transistors bei $U_D=9\text{ V}$ und $I_D=1\text{ mA}$ liegen soll. Nutzen Sie zur Berechnung die ermittelten Kennlinien. Legen Sie R_G so fest, daß die Signalquelle durch den Verstärker mit einem Eingangswiderstand $r_e > 800\text{ k}\Omega$ belastet wird.

Berechnen Sie den Kondensator C_S für eine untere zu übertragende Frequenz von 500 Hz mit der Bedingung $X_C < 0,1 R_S$. Berechnen Sie in gleicher Weise C_1 und C_2 , wenn der Lastwiderstand $1\text{ M}\Omega$ (Eingangswiderstand des Oszilloskopes) beträgt. Wählen Sie vorhandene Normwerte aus.

Bauen Sie die Schaltung nach Bild 3 auf. Für R_D wählen Sie den am nächsten liegenden vorhandenen Wert. Verwenden Sie für R_S eine Widerstandsdekade und stellen Sie damit den o.g. Arbeitspunkt ein. Vergleichen Sie den eingestellten und den berechneten Widerstandswert.

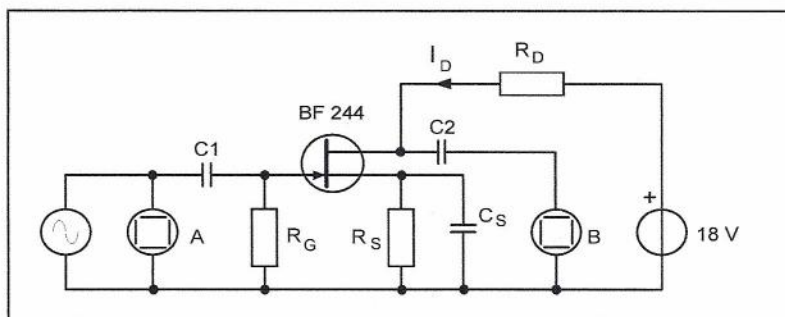


Bild 3: Verstärker in Sourceschaltung

Verstärken Sie eine sinusförmige Wechselspannung ($f=5\text{ kHz}$, $U \leq 100\text{ mV}_{SS}$). Bestimmen Sie die Spannungsverstärkung der Schaltung.

Die Spannungsverstärkung läßt sich nach

$$V_U = S \frac{R_D * r_{DS}}{R_D + r_{DS}} \quad /2/$$

berechnen. Vergleichen Sie Ihr Meßergebnis mit dem berechneten Wert.

Versuchs vorbereitung

2.2.

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

$$\pm \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}} = 1 - \frac{U_{GS}}{U_P}$$

$$\pm \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}} + 1 = \frac{U_{GS}}{U_P}$$

$$U_{GS} = U_P \left(\pm \sqrt{\frac{I_D}{I_{DSS}}} + 1 \right)$$

$$U_{GS} = -1,5V \left(\pm \sqrt{\frac{2\mu A}{5\mu A}} + 1 \right)$$

$$U_{GS_1} = -2,45V$$

$$U_{GS_2} = -0,55V \quad \checkmark$$

$$U_{RS} = -U_{GS} = 0,55V$$

$$\frac{U_{RS}}{I_D} = R_S = \frac{0,55V}{2\mu A} = 275\Omega$$

nach E24 $R_S = 300\Omega$

270Ω ist auch
in E24 enthalten
SMD-chip-widerstand

Bauprobe 0402

$$U_{RS} = I_D \cdot R_S = 2\mu A \cdot 300\Omega$$

$$\underline{\underline{U_{RS} = 0,6V}}$$

$$\underline{\underline{U_{GS} = -U_{RS} = -0,6V}}$$

$$U_{DS} = \frac{U_1}{2} - U_{RS}$$

$$U_{DS} = \frac{12V}{2} - 0,6V$$

$$\underline{\underline{U_{DS} = 5,4V}}$$

$$U_D = U_1 - U_{DS} = 12V - 5,4V = 6,6V$$

$$U_D = U_1 - U_{DS} - U_{RS} = 6V$$

$$R_D = \frac{U_D}{I_D} = \frac{6,6V}{2mA} = 3300\Omega \quad \text{3 k}\Omega \quad \text{Folgerfehler}$$

$$\underline{\underline{\text{nach E24 } R_D = 3,3 k\Omega}}$$

SMD-Chipwiderstand
Baugröße 0402

$$R_G > R_i \quad I_{GS} \cdot R_G \leq 0,01 U_{GS}$$

$$R_G \leq \frac{0,01 \cdot U_{GS}}{I_{GS}} = \frac{0,01 \cdot 0,6V}{5\mu A}$$

$$R_G \leq 1,2 M\Omega$$

$$R_i < R_G \leq 1,2 M\Omega$$

$$R_G = 10 \cdot R_i = 10 \cdot 5 k\Omega = 50 k\Omega$$

$$\underline{\underline{R_G = 51 k\Omega \text{ nach E24}}}$$

SMD-Chipwiderstand
Baugröße 0402



$$X_{C1} \ll R_i + R_E \parallel r_{GS} \approx 51 \text{ k}\Omega$$

$$C_1 \approx \frac{10 \dots 100}{2 \cdot \pi \cdot f_{\min} \cdot 51 \text{ k}\Omega} = (10 \dots 100) \frac{1}{2 \pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 51 \text{ k}\Omega}$$

$$C_1 = (10 \dots 100) 62,41 \mu\text{F}$$

$$624,1 \mu\text{F} < C_1 < 6241 \mu\text{F}$$

$$\underline{\underline{C_1 = 0,68 \mu\text{F}}} \text{ nach E24} \quad \begin{array}{l} \text{Baueart:} \\ \text{MKC} \end{array}$$

✓

$$C_2 = (10 \dots 100) \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{\min} \cdot R_L} = (10 \dots 100) \frac{1}{2 \pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 50 \text{ k}\Omega}$$

$$C_2 = (10 \dots 100) 63,66 \mu\text{F}$$

$$636,6 \mu\text{F} < C_2 < 6366 \mu\text{F}$$

$$\underline{\underline{C_2 = 0,68 \mu\text{F}}} \quad \text{Baueart: MKC}$$

✓

$$X_{C3} \ll R_S$$

$$C_3 = (10 \dots 100) \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{\min} \cdot R_S} = (10 \dots 100) \frac{1}{2 \pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 300 \Omega}$$

270

$$C_3 = (10 \dots 100) 10,61 \mu\text{F}$$

$$106,1 \mu\text{F} < C_3 < 1061 \mu\text{F}$$

$$\underline{\underline{C_3 = 110 \mu\text{F}}} \text{ nach E24} \quad \begin{array}{l} \text{Baueart:} \\ \text{Elko - Tantal-fest} \end{array}$$

✓

$$S = 3 \cdot \frac{10\mu\text{S}}{-U_p} \left(\sqrt{\frac{U_{GS} - U_{GS}}{-U_p}} - \sqrt{\frac{U_{GS}}{U_p}} \right)$$

$$S = 3 \cdot \frac{5\mu\text{A}}{1.5\text{V}} \left(\sqrt{\frac{5.4\text{V} + 0.6\text{V}}{1.5\text{V}}} - \sqrt{\frac{-0.6\text{V}}{-1.5\text{V}}} \right)$$

$$\underline{\underline{S = 0,01375}}$$

$$V_u = -S \frac{R_D \cdot R_L}{R_D + R_L} = -0,01375 \text{ S} \cdot \frac{3,3\text{k}\Omega \cdot 50\text{k}\Omega}{3,3\text{k}\Omega + 50\text{k}\Omega}$$

$$\underline{\underline{V_u = -42,41}}$$

2.1.

$$U_{DS} = 12V$$

$$I_D = 5,3 \mu A$$

$$P = 0,0636W = 63,6 \mu W$$

$$P < P_{TOT}$$

$$63,6 \mu W < 300 \mu W$$

keine Maßnahmen erforderlich. ✓

Abschürrspannung ermitteln:

$$U_{GS} = -1,886V \quad \text{bei } U_{DS} = 1V$$

$$\underline{U_p = U_{GS} = -1,886V} \quad \checkmark$$

$$U_{GS} = -2,08V \quad \text{bei } U_{DS} = 8V$$

$$\underline{U_p = U_{GS} = -2,08V} \quad \checkmark$$

Steilheit aus Diagramm:

$$s = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} \quad \left| \begin{array}{l} \Delta I_D = 0,97 \mu A \\ \Delta U_{GS} = 0,35 V \end{array} \right.$$

$$s = \frac{0,97 \mu A}{0,35 V}$$

$$\underline{s = 2,49 \frac{\mu A}{V}} \quad \checkmark$$

r_{DS} aus Diagramm ermittelt:

$$r_{DS} = \frac{\Delta U_{DS}}{\Delta I_D} \quad \left| \quad \begin{array}{l} \Delta U_{DS} = 12V - 5V = 7V \\ \Delta I_D = 1,03mA - 0,97mA = 0,06mA \end{array} \right.$$

$$r_{DS} = \frac{7V}{0,06mA} = 116,7k\Omega$$

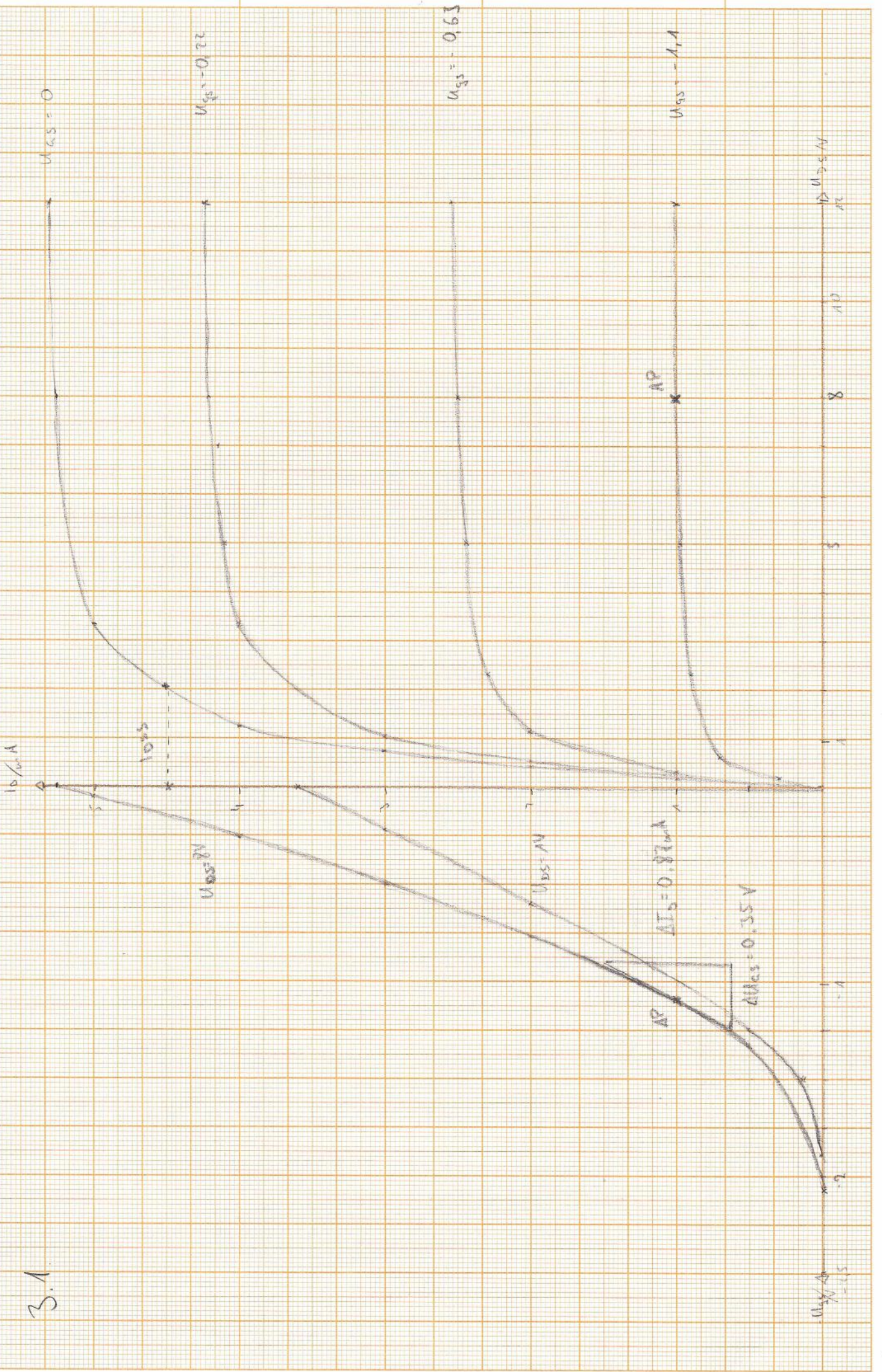
$I_{DSS} = 4,5mA$ grafisch ermittelt

U_{GS} / V		0,000	0,250	-0,775	-1,325	-2,08
I_D / mA	berechnet	4,50	3,48	1,77	0,60	0,00
	grafisch ermittelt	5,57	4,00	2,00	0,50	0,00

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

Je weiter man sich an U_p nähert, desto weiter nähern sich berechneter und gemessener Wert an.

3.1



3.2.

$$\underline{R_D} = \frac{U_D}{I_D} = \frac{9V}{1mA} = \underline{\underline{9k\Omega}}$$

$$R_S = \frac{U_{RS}}{I_D} \quad \left| \begin{array}{l} U_{RS} = -U_{GS} \\ U_{GS \text{ grafisch}} = 1V \end{array} \right.$$

$$\underline{\underline{R_S = \frac{1V}{1mA} = 1k\Omega}}$$

$$r_e > 800 k\Omega \quad r_e = R_G \quad \rightarrow \quad R_G > 800 k\Omega$$

$$\underline{\underline{R_G = 1M\Omega}}$$

$$C_k = (10 \dots 100) \cdot \frac{1}{2\pi f_{\min} \cdot R_k} \quad f_{\min} > 500 \text{ Hz}$$

$$k=1 \hat{=} R_k = R_G ; C_k = C_1$$

$$C_1 = (10 \dots 100) \cdot 0,32 \mu\text{F}$$

$$\underline{\underline{C_1 = 10 \mu\text{F}}}$$

$$k=2 \hat{=} R_k = R_{\text{out}} = 1M\Omega, C_k = C_2$$

$$C_2 = (10 \dots 100) \cdot 0,32 \mu\text{F}$$

$$\underline{\underline{C_2 = 10 \mu\text{F}}}$$

$$k=3 \hat{=} R_k = R_S, C_k = C_3$$

$$C_3 = (10 \dots 100) \cdot 0,32 \mu\text{F}$$

$$C_3 = 1 \mu\text{F}$$

Eingestellf:

$$R_S = 1,25 \text{ k}\Omega$$

gemessen:

$$U_{1SS} = -101,2 \text{ mV}$$

$$U_{2SS} = 2,275 \text{ V}$$

$$V_u = \frac{U_{2SS}}{U_{1SS}} = \frac{2,275 \text{ V}}{-101,2 \text{ mV}} = +22,48$$



berechnet:

$$r_{DS} = 116,7 \text{ k}\Omega$$

$$R_D = 10 \text{ k}\Omega$$

$$S = +2,49 \frac{\mu\text{A}}{\text{V}}$$

$$V_u = S \frac{R_D \cdot r_{DS}}{R_D + r_{DS}}$$

$$V_u = 2,49 \frac{\mu\text{A}}{\text{V}} \frac{10 \text{ k}\Omega \cdot 116,7 \text{ k}\Omega}{10 \text{ k}\Omega + 116,7 \text{ k}\Omega}$$

$$\underline{\underline{V_u = 22,93}}$$



$$V_{u \text{ berechnet}} \approx V_{u \text{ gemessen}}$$

$$22,93 \approx 22,48$$

