

Tutorium 3 - Feldeffekttransistoren

Sven Flerlage

Institut für Mikro- und Nanoelektronische Systeme

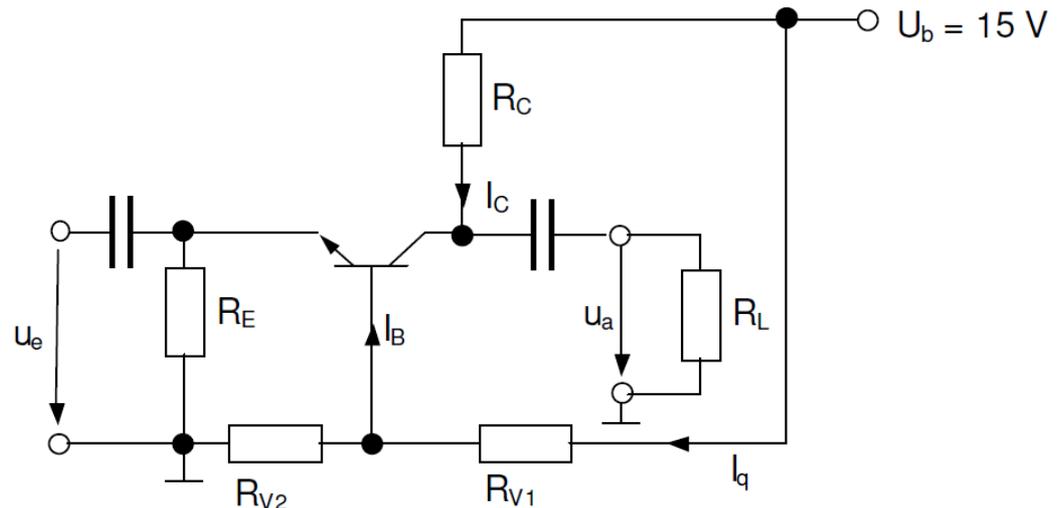


Übersicht

- Organisatorisches
- Vorstellung der letzten Abgabe
- Einleitung
- Rechnen der Aufgaben
- Zusammenfassung
- Ausblick

Aufgabe 9.1 – 9.3

Gegeben ist eine Transistorschaltung nach Bild 9.1. Der Transistor habe eine Stromverstärkung von $\beta = B = 400$. Die Kondensatoren können für Wechselstrom als Kurzschluss betrachtet werden. Die Widerstände haben folgende Werte: $R_{V1} = 9,1 \text{ k}\Omega$, $R_{V2} = 3,9 \text{ k}\Omega$, $R_C = 1,2 \text{ k}\Omega$, $R_E = 1 \text{ k}\Omega$, $R_L = 6 \text{ k}\Omega$ (Annahme: $I_B \ll I_q$)

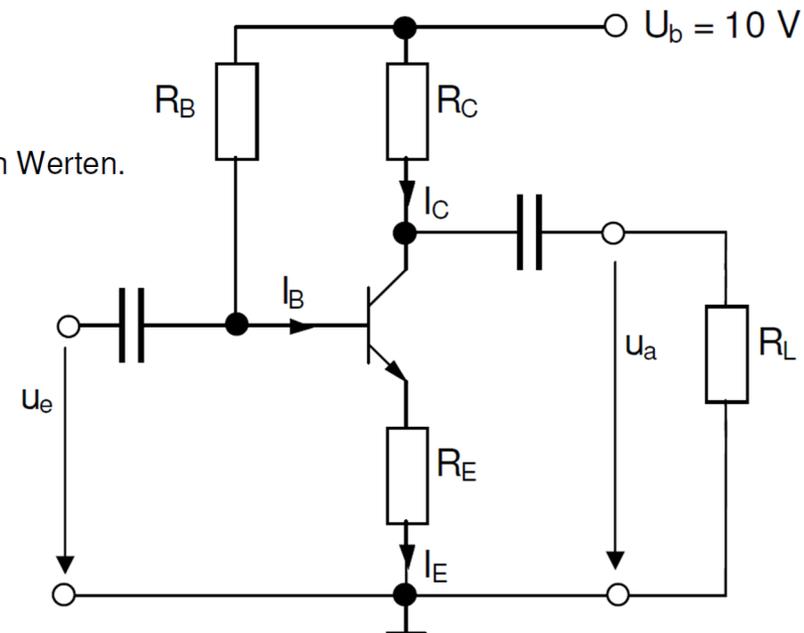


- 9.1 In welcher Grundschaltung wird der Transistor betrieben ?
- 9.2 Skizzieren Sie das Großsignalersatzschaltbild für die Schaltung in Bild 9.1 !
- 9.3 Skizzieren Sie das Kleinsignal-Ersatzschaltbild für die Schaltung in Bild 9.1 !

Aufgabe 11

Gegeben ist eine Transistorschaltung nach Bild 11.1. Der Transistor habe eine Stromverstärkung von $\beta = B = 225$. Die Kondensatoren können für Wechselstrom als Kurzschluss betrachtet werden. Folgende Widerstandswerte sind gegeben: $R_C = 6 \text{ k}\Omega$, $R_E = 3 \text{ k}\Omega$, $R_L = 3 \text{ k}\Omega$.

- 11.1 In welcher Grundschaltung wird der Transistor betrieben?
- 11.2 Skizzieren Sie das Großsignal-Ersatzschaltbild für die Schaltung in Bild 11.1.
- 11.3 Skizzieren Sie das Kleinsignal-Ersatzschaltbild für die Schaltung in Bild 11.1.
- 11.4 Berechnen Sie die Ströme I_B und I_C , sowie den Widerstand R_B für eine Kollektor-Emitterspannung $U_{CE} = 4 \text{ V}$.
- 11.5 Berechnen Sie die Steilheit S mit den in Aufgabe 11.4 gefundenen Werten.
- 11.6 Berechnen Sie die Spannungsverstärkung A der Schaltung.



Noch Fragen ?

Feldeffekttransistoren

- Allgemeines :
- Anschlüsse **Gate(G)**, **Drain(D)**, **Source(S)**
- Vgl.: Bipolar: Basis(B), Kollektor(C), Emitter(E)

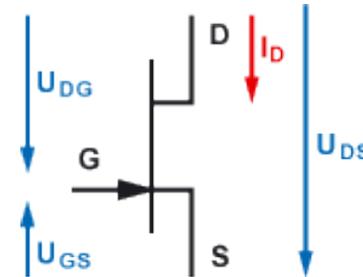
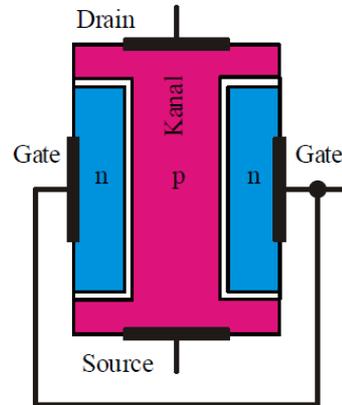
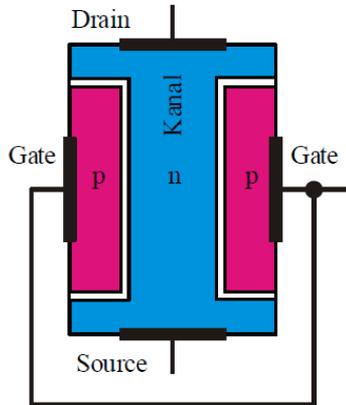
- Unterscheidung zwischen **linearem Bereich** und **Sättigungsbereich**

- $U_{DS} < U_{GS} - U_{th}$: linearer Bereich

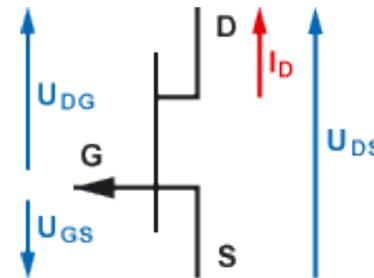
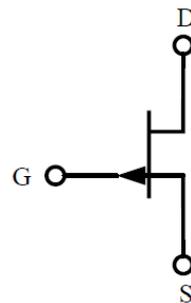
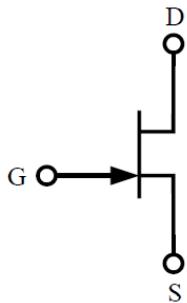
- $U_{DS} > U_{GS} - U_{th}$: Sättigungsbereich

Wichtig !!! Stehen nicht auf der Formelsammlung

Sperrschicht-FET (JFET)

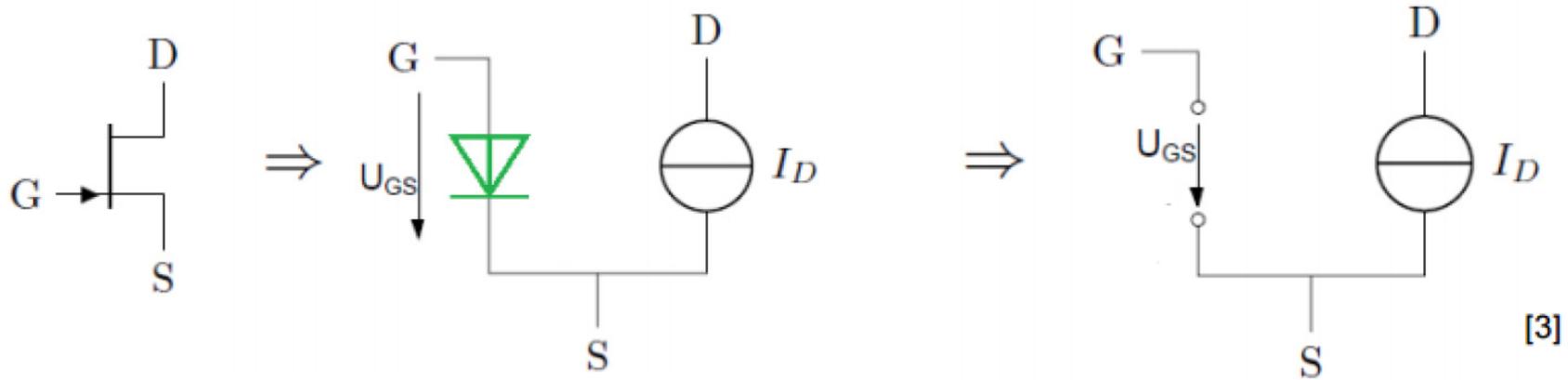


Spannungen und Ströme am n-Kanal JFET



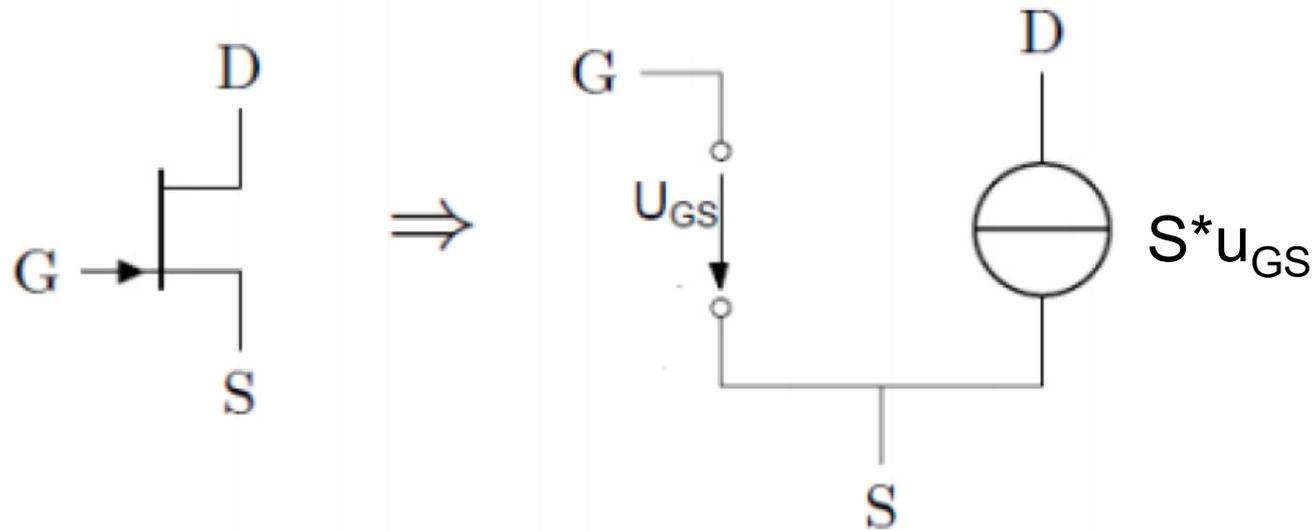
Spannungen und Ströme am p-Kanal JFET

JFET Großsignalersatzschaltbilder



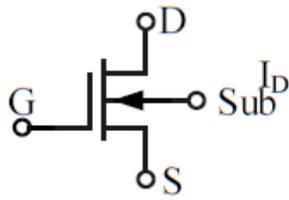
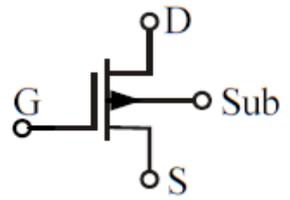
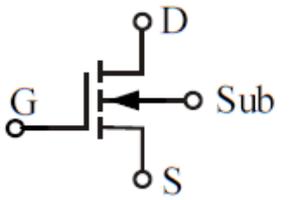
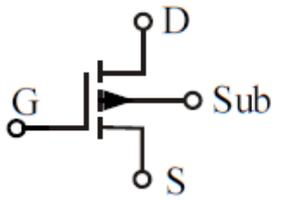
- Da U_{GS} negativ ist wird die Diode in Sperrrichtung betrieben, es fließt also kein Gatestrom: $I_G = 0 \text{ mA}$

JFET Kleinsignalersatzschaltbild

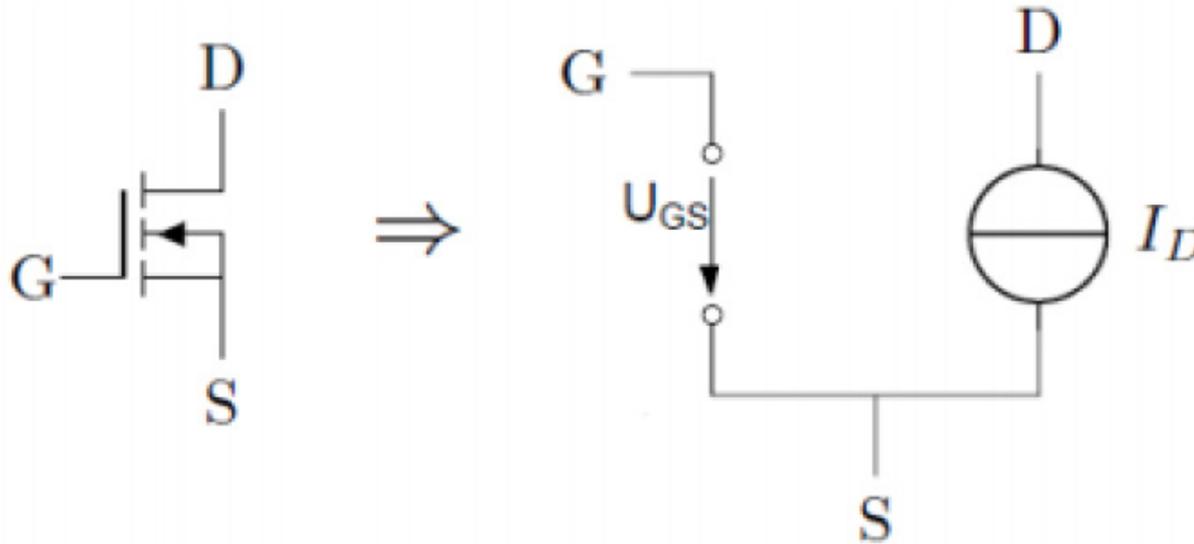


Isolierschicht-FET (MOSFET)

■ Metal-Oxid-Semiconductor-Field-Effect-Transistor

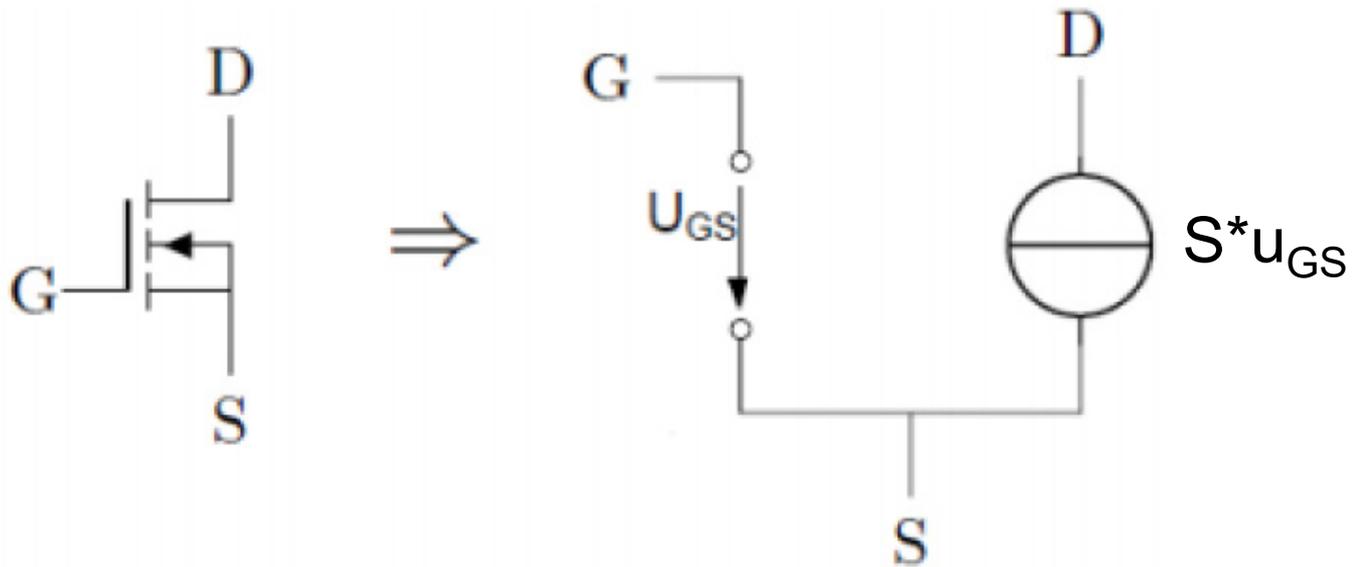
selbstleitend (Verarmungstyp)		selbstsperrend (Anreicherungstyp)	
n-Kanal	p-Kanal	n-Kanal	p-Kanal
 <p>Diagram of a self-conducting n-channel MOSFET. The gate (G) is on the left, the drain (D) is at the top, and the source (S) is at the bottom. The substrate (Sub) is connected to the source. The drain current is labeled I_D.</p>	 <p>Diagram of a self-conducting p-channel MOSFET. The gate (G) is on the left, the drain (D) is at the top, and the source (S) is at the bottom. The substrate (Sub) is connected to the source.</p>	 <p>Diagram of a self-insulating n-channel MOSFET. The gate (G) is on the left, the drain (D) is at the top, and the source (S) is at the bottom. The substrate (Sub) is connected to the source.</p>	 <p>Diagram of a self-insulating p-channel MOSFET. The gate (G) is on the left, the drain (D) is at the top, and the source (S) is at the bottom. The substrate (Sub) is connected to the source.</p>

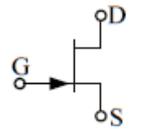
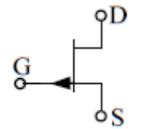
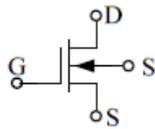
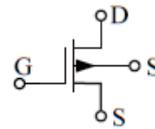
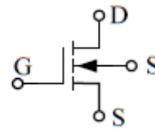
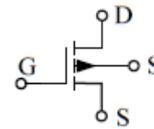
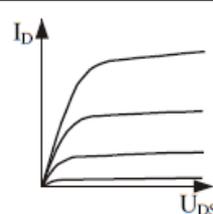
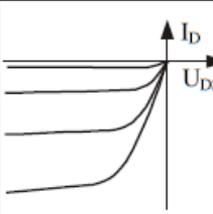
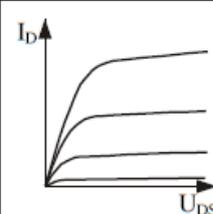
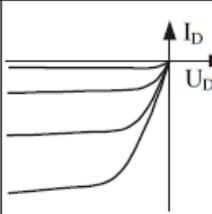
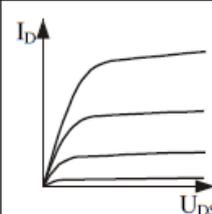
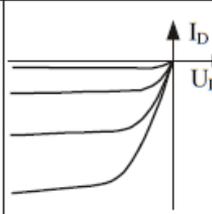
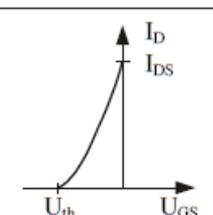
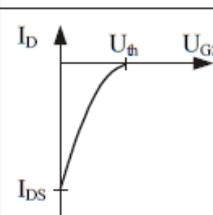
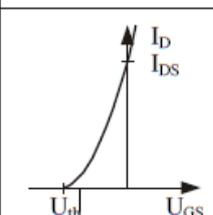
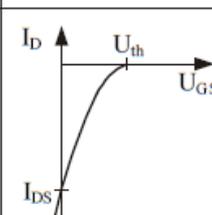
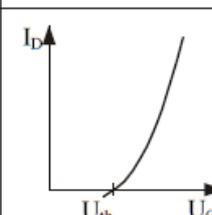
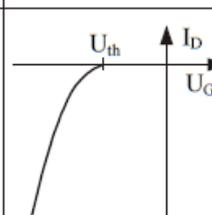
MOSFET Großsignalersatzschaltbild



- Auch hier gilt wieder $I_G = 0\text{mA}$

MOSFET Kleinsignalersatzschaltbild

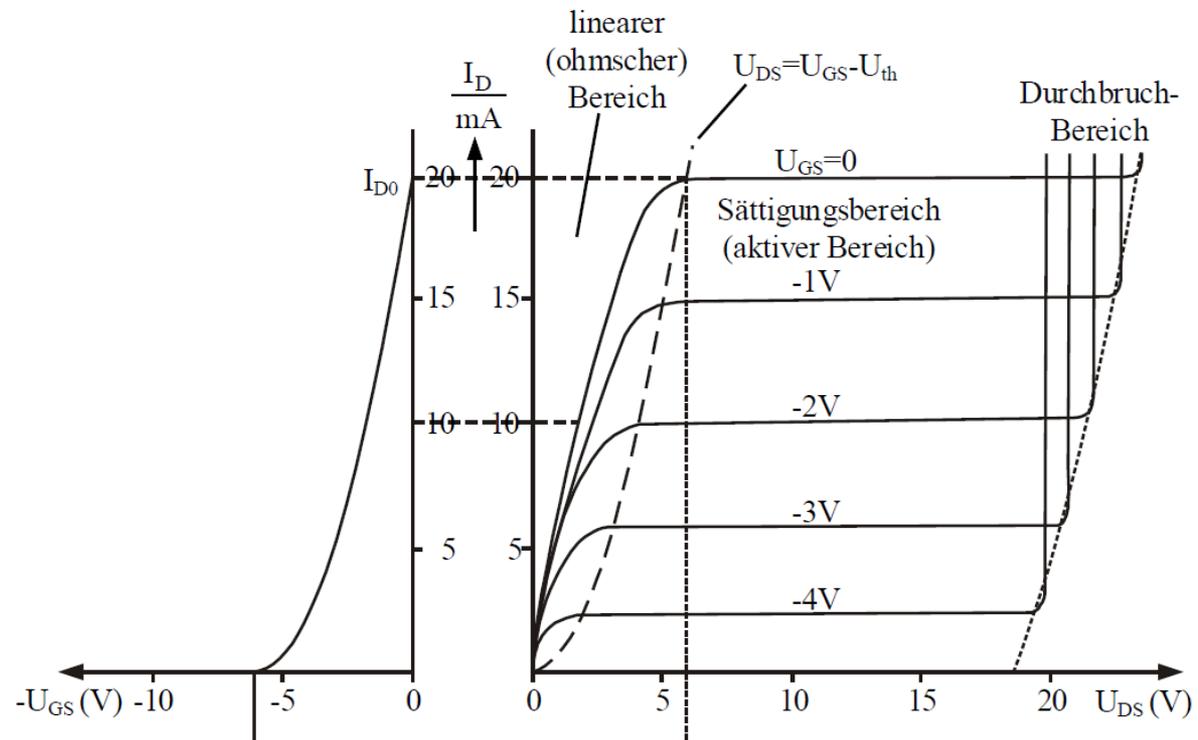


Feldeffekttransistoren					
Sperrschicht-FET (J-FET)		Isolierschicht-FET (MOSFET)			
selbstleitend (Verarmungstyp)		selbstleitend (Verarmungstyp)		selbstsperrend (Anreicherungstyp)	
n-Kanal	p-Kanal	n-Kanal	p-Kanal	n-Kanal	p-Kanal
					
					
					
diskrete Verstärker	diskrete Verstärker	diskrete Hochfrequenzverstärker	diskrete Hochfrequenzverstärker	diskrete Leistungsverstärker	diskrete Leistungsverstärker
analoge ICs	analoge ICs	analoge ICs	analoge ICs	digitale ICs	digitale ICs

■ Skript Seite 97

Berechnen von U_{th}

- Bei konstantem Wert von $U_{DS} \Rightarrow I_D$ für unterschiedliche U_{GS} ablesen
- $\sqrt{I_D}$ gegen U_{GS} auftragen
- Gerade einzeichnen
- \Rightarrow Schnittpunkt der Geraden mit $\sqrt{I_D} = 0 \Rightarrow U_{th}$



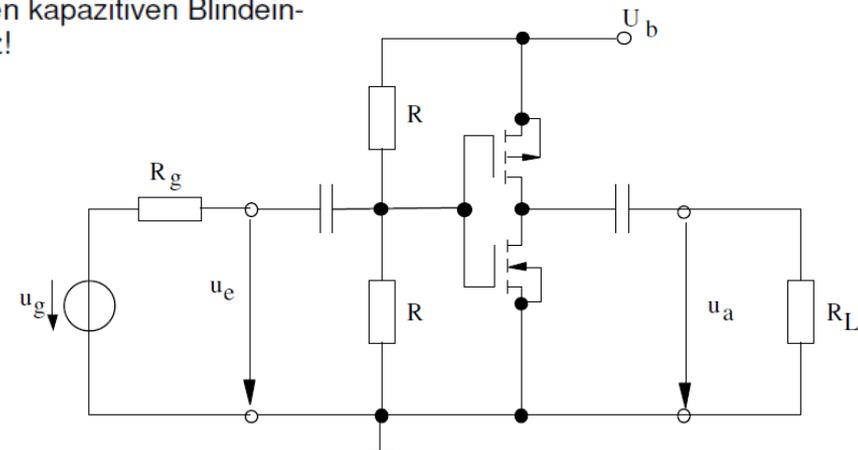
Noch Fragen ?

Aufgabe 12

Gegeben ist ein CMOS – Verstärker nach Bild 12.1. Die Spannungsquelle liefert ein sinusförmiges Signal mit $u_g = 30$ mV Effektivwert. Der Innenwiderstand der Quelle ist $R_g = 1$ M Ω . Die Transistoren haben folgende Daten:

$U_{thn} = 2$ V, $U_{thp} = -2$ V, $\beta_n = \beta_p = 1$ mA / V², $I_n = I_p = 1$ μ m, $w_n = 5$ μ m, $\mu_n = 1200$ cm²/Vs, $\mu_p = 400$ cm²/Vs, $\epsilon_{ox} = 4,6$ (4,52), $t_{ox} = 20$ nm(24nm); $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ As / Vm. Die Early-Spannung der beiden Transistoren ist $|U_A| = 400$ V. Die Werte der Widerstände sind $R = 10$ M Ω , $R_L = 10$ k Ω . Die Versorgungsspannung ist $U_b = 12$ V.

- 12.1 Bestimmen Sie für den Arbeitspunkt der Schaltung folgende Größen: U_{DS} , U_{GS} , I_D
- 12.2 Berechnen Sie den Eingangswiderstand r_{ein} und die Eingangsspannung u_e der Schaltung !
- 12.3 Berechnen sie die Steilheit S und die Spannungsverstärkung A der Schaltung im Arbeitspunkt !
- 12.4 Berechnen Sie folgenden Kapazitäten: C_{GSn} , C_{GSp} und C_{ein} der CMOS - Schaltung !
- 12.5 Die Signalfrequenz der Quelle ist $f = 20$ kHz. Berechnen Sie den kapazitiven Blindeingangswiderstand X_C der CMOS - Schaltung für diese Frequenz!



Aufgabe 13

■ $R_G = 10\text{k}\Omega$; I_G sei vernachlässigbar ; für AC => Kondensatoren= Kurzschluss

- 13.1 In welcher Grundschialtung wird der JFET betrieben?
- 13.2 Skizzieren Sie das Großsignalersatzschaltbild der Schaltung in Bild 13.1 !
- 13.3 Lesen Sie aus dem Kennlinienfeld den Drainstrom I_{D0} ab !
- 13.4 Der Transistor soll bei $U_{GS} = -2\text{V}$ betrieben werden. Berechnen Sie den Wert des dazu erforderlichen Widerstands R_S ! ($I_D = 2,5\text{ mA}$)
- 13.5 $R_D = 3,6\text{ k}\Omega$. Tragen Sie die Lastgerade in das Kennlinienfeld ein und markieren Sie den Arbeitspunkt! Berechnen Sie die Drain-Source Spannung im Arbeitspunkt!
- 13.6 Skizzieren Sie das Kleinsignalersatzschaltbild der Schaltung in Bild 13.1 !
- 13.7 Berechnen Sie den Eingangswiderstand der Schaltung wenn $R_G = 820\text{ k}\Omega$ ist !
- 13.8 Ermitteln Sie aus dem Kennlinienfeld graphisch die Schwellspannung U_{th} des Transistors und tragen Sie die Konstruktion in Bild 13.3 ein !
(siehe Skript S. 63, bitte zuerst die Achsen beschriften)
- 13.9 Berechnen Sie die Steilheit S im Arbeitspunkt und die Spannungsverstärkung A der Schaltung, wenn $R_L = 10\text{ M}\Omega$ ist !
- 13.10 Tragen Sie die Lastgerade für den Betrieb mit Wechselspannungen für die angegebenen Widerstandswerte ($R_D = 3,6\text{ k}\Omega$, $R_L = 10\text{ M}\Omega$ in das Kennlinienfeld ein!

Aufgabe 14

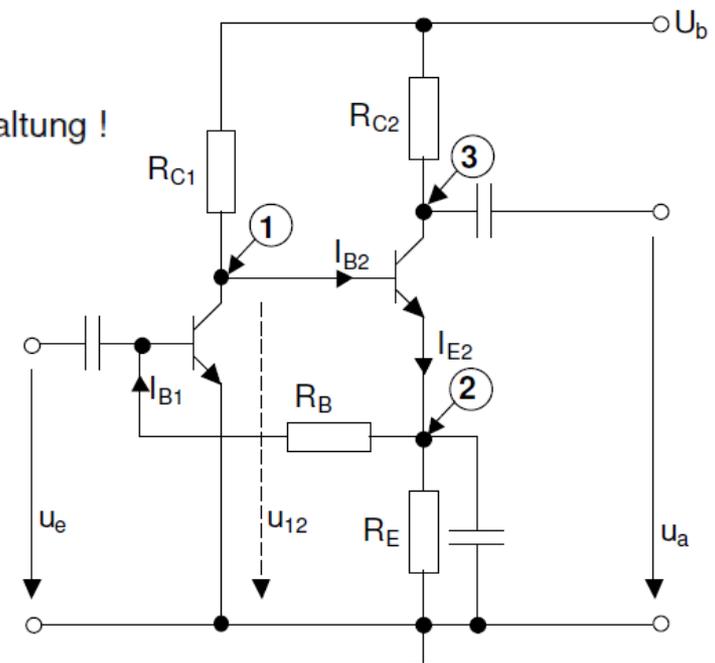
■ n-Kanal MOSFET; $U_{th} = -1,5 \text{ V}$; $I_{D0} = 5 \text{ mA}$

- 14.1 In welcher Grundschaltung wird der MOSFET betrieben?
- 14.2 Skizzieren Sie das Großsignalersatzschaltbild der Schaltung in Bild 14.1 !
- 14.3 Bei einer punktwisen Aufnahme der Kennlinie wird bei einer angelegten Gate-Source-Spannung $U_{GS} = 2 \text{ V}$ eine Drain-Source-Spannung $U_{DS} = 2 \text{ V}$ gemessen. In welchem Bereich des Kennlinienfeldes (linear oder Sättigung) befindet sich der gemessene Punkt ? Berechnen Sie den zu diesem Punkt gehörigen Drainstrom I_D !
- 14.4 Die Schaltung soll bei $U_{GS} = 0 \text{ V}$ betrieben werden. Welchen Wert muss R_D annehmen, damit der Arbeitspunkt der Schaltung bei der Hälfte der Versorgungsspannung liegt ?
- 14.5 Berechnen Sie die Steilheit S im Arbeitspunkt.
- 14.6 Skizzieren Sie das Kleinsignalersatzschaltbild der Schaltung in Bild 14.1
- 14.7 Die Signalquelle hat eine Leerlaufspannung $u_g = \pm 0,1 \text{ V}$ und einen Innenwiderstand $R_g = 510 \text{ k}\Omega$. Welchen Wert muss der Widerstand R_G annehmen, damit die Eingangsspannung u_e im Bereich $u_e = \pm 0,05 \text{ V}$ liegt ?
- 14.8 Die Schaltung soll eine Mindestspannungsverstärkung $A_{min} = 10$ nicht unterschreiten. Welchen Wert darf der Lastwiderstand R_L minimal annehmen, damit die geforderte Bedingung eingehalten wird !
- 14.9 Die Schaltung in Bild 14.1 soll durch Hinzufügen eines Bauelements so verändert werden, dass der Arbeitspunkt der Schaltung bei $U_{GS} = -0,5 \text{ V}$ liegt.
 - Wie kann das erreicht werden?
 - Berechnen sie den Drainstrom und die Drain-Source-Spannung für den neuen Arbeitspunkt.
 - Welches Bauelement muss verändert werden, damit der Arbeitspunkt wieder bei $U_{DS}=10 \text{ V}$ liegt
 - Berechnen Sie die Verstärkung der so veränderten Schaltung ($R_L = \text{Wert aus 14.8}$)

Aufgabe 15 (optional)

■ $B = \beta = 100$; $U_{BE} = 0,7V$; $R_{C1} = 100k\Omega$; $R_{C2} = 12k\Omega$; $R_B = 330k\Omega$; $R_E = 1,8k\Omega$; $U_b = 12V$

- 15.1 Skizzieren Sie das Großsignalersatzschaltbild der gesamten Schaltung!
- 15.2 Berechnen Sie die Gleichspannungen an den Punkten 1, 2 und 3!
- 15.3 Skizzieren Sie das Kleinsignalersatzschaltbild der gesamten Schaltung!
- 15.4 Berechnen Sie den Eingangswiderstand r_e der Schaltung!
- 15.5 Berechnen Sie den Ausgangswiderstand r_a der Schaltung!
- 15.6 Berechnen Sie die Spannungsverstärkung $A = u_a / u_e$ der Schaltung!



Aufgabe 16 (optional)

Gegeben ist eine Verstärkerschaltung nach Bild 16.1.

Die Widerstände haben die Werte: $R_1 = 15 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 3 \text{ k}\Omega$, $R_{C1} = 4,7 \text{ k}\Omega$, $R_{E1} = 1,0 \text{ k}\Omega$, $R_{C2} = 1 \text{ k}\Omega$, $R_{E2} = 2 \text{ k}\Omega$, $R_L = 10 \text{ k}\Omega$. Die Kondensatoren können für Wechselspannungen als Kurzschluss betrachtet werden. Der Stromverstärkungsfaktor der beiden Transistoren ist $B = \beta = 400$.

(Annahme: $U_{BE1} = U_{BE2} = 0,7 \text{ V}$, $I_q \gg I_{B1}$, $I_{C1} \approx I_{E1}$, $I_{B2} \ll I_{C1}$, $I_{C2} \approx I_{E2}$, r_{CE1} , $r_{CE2} \rightarrow \infty$, $U_T = 26 \text{ mV}$)

- 16.1 In welchen Grundschaltungen werden die Transistoren betrieben?
- 16.2 Zeichnen Sie das Großsignalersatzschaltbild der Schaltung in Bild 16.1
- 16.3 Berechnen Sie den Arbeitspunkt (I_{C1} und U_{CE1}) und die Steilheit S_1 für Transistor 1
- 16.4 Berechnen Sie den Arbeitspunkt (I_{C2} und U_{CE2}) und die Steilheit S_2 für Transistor 2
- 16.5 Zeichnen Sie das Kleinsignalersatzschaltbild der Schaltung in Bild 16.1
- 16.6 Berechnen Sie den Eingangswiderstand der 2. Verstärkerstufe r_{e2} .
- 16.7 Berechnen Sie den Ausgangswiderstand 2. Verstärkerstufe r_{a2} .
- 16.8 Berechnen Sie die Gesamt-Spannungsverstärkung A_g der Schaltung in Bild 16.1!

Zusammenfassung

- Ersatzschaltbilder der Feldeffekttransistoren
- $U_{DS} < U_{GS} - U_{th}$: linearer Bereich
- $U_{DS} > U_{GS} - U_{th}$: Sättigungsbereich
- Berechnung von U_{th} aus dem Kennlinienfeld
- unterschiedliche Verhalten der verschiedenen FET's
 - Skript Seite 97

Noch Fragen ?

Ausblick

- Nächstes Tutorium: 26.06.2018
 - Thema: Operationsverstärker

**Vielen Dank für die
Aufmerksamkeit**