

Aufgabe 1: Passive Bauelemente (20 Punkte)

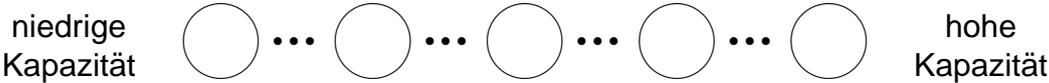
Kondensatoren erfüllen in elektronischen Schaltungen eine Vielzahl von Aufgaben. Im Folgenden sollen daher verschiedene Realisierungen von Kondensatoren untersucht werden.

Hinweis: Die einzelnen Aufgabenpunkte 1.1 bis 1.4 können unabhängig voneinander gelöst werden. $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm}$

1.1 Gegeben sind die folgenden Kondensator-Typen:

1. Aluminium-Elektrolyt-Kondensator
2. Keramik-Kondensator
3. Doppelschicht-Kondensator
4. Tantal-Elektrolyt-Kondensator
5. Kunststoff-Folien-Kondensator

Ordnen Sie die fünf Kondensator-Typen nach ihrer Volumen-Kapazität F/cm^3 !



1.2 Gegeben ist der in Abb. 1.1 dargestellte schematische Aufbau eines unipolaren Kondensators.

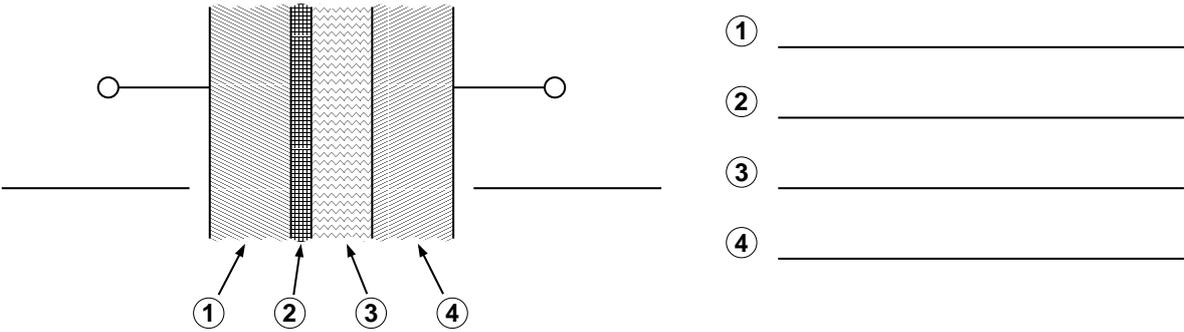


Abb. 1.1: Schematischer Aufbau eines Kondensators

- a) Um welchen Kondensator-Typ handelt es sich?
- b) Tragen sie in Abb 1.1 ein, aus welchen Materialien die Schichten 1 bis 4 bestehen!
- c) Welcher Anschluss des Kondensators stellt die Anode dar, welcher die Kathode? Beschriften Sie die entsprechenden Knoten in Abb 1.1!

- d) Wie muss der Aufbau des Kondensators verändert werden, damit ein bipolarer Betrieb möglich ist?
- e) Aus welchem Grund wird die Anode dieses Kondensator-Typs aufgeraut?
- f) In welchem Anwendungsbereich wird dieser Kondensator-Typ häufig eingesetzt?
- g) Nennen Sie wenigstens zwei negative Eigenschaften dieses Kondensator-Typs!

1.3 Eine gängige Realisierung von Kapazitäten in integrierten Schaltungen ist in Abb. 1.2 dargestellt. Dabei werden Metallebenen horizontal geschichtet und entsprechend miteinander verbunden (HPP: horizontale parallele Platten).

Hinweis: In den folgenden Aufgabenteilen können Streufelder vernachlässigt werden. Die Metallisierungen haben dieselbe Dicke t_m .

- a) Berechnen Sie allgemein die Flächenkapazität in Abhängigkeit der Eigenschaften der Dielektrika, also $C_{\square, \text{HPP}} = f(\epsilon_{r1}, \epsilon_{r2}, d_{12}, d_{23})$! Wie groß ist die Flächenkapazität in $\text{fF}/\mu\text{m}^2$ für $d_{12} = d_{23} = 400 \text{ nm}$, $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r2} = \epsilon_r = 3,9$.
- b) Wie ist die prozentuale Änderung von $C_{\square, \text{HPP}}$, wenn sich die Abstände d_{12} und d_{23} der Kondensatorplatten um 20% vergrößern (t_m ändert sich nicht)?
- c) Wie ist die prozentuale Änderung von $C_{\square, \text{HPP}}$, wenn sich die Dicken der Metallisierungen t_m um 20% vergrößern (d_{12} und d_{23} ändern sich nicht)?
- d) Da die untere Kondensatorplatte eine parasitäre Kapazität zum Substrat hin hat, sind die Eingangskapazitäten in die Klemmen A und B unterschiedlich. Durch welche schaltungstechnische Maßnahme lässt sich dieses Problem beheben?

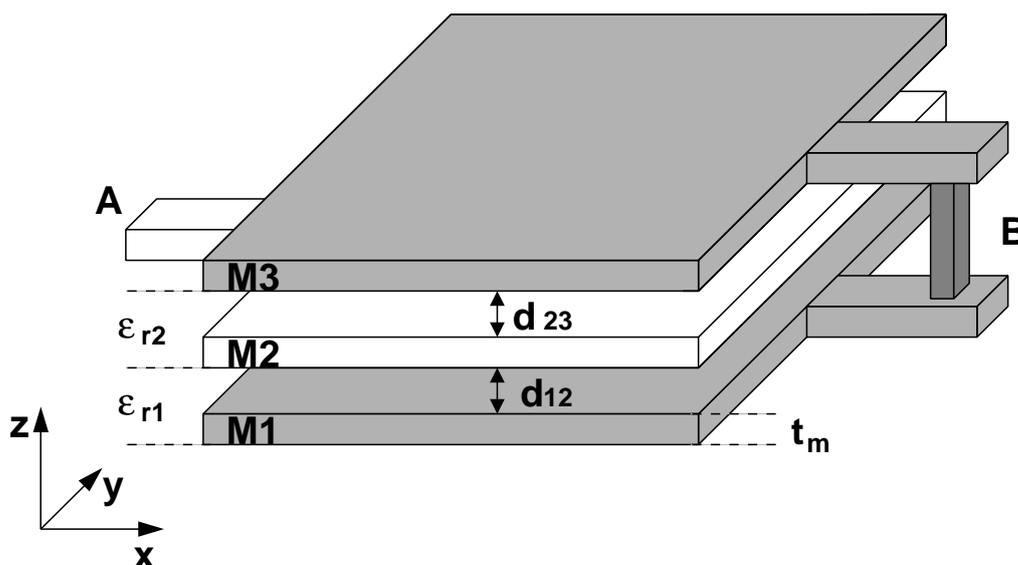


Abb. 1.2: Aufbau einer Kapazität aus horizontalen Metalllagen

1.4 Eine andere Realisierung integrierter Kapazitäten ist in Abb. 1.3 dargestellt. Dabei werden schmale Metallstreifen übereinander platziert und durch Vias vertikal miteinander verbunden. Dadurch ergeben sich sogenannte vertikale, parallele Platten (VPP), oder Finger. Folgende Parameter sind gegeben: $s = w = 200 \text{ nm}$, $t_m = 350 \text{ nm}$, $d_{12} = d_{23} = 400 \text{ nm}$, $\epsilon_{r1} = \epsilon_{r2} = \epsilon_{r3} = \epsilon_r = 3,9$.

Hinweis: In den folgenden Aufgabenpunkten soll der Einfluss der Zuleitungen der Knoten A und B in Bezug auf die Eigenschaften des Kondensators vernachlässigt werden.

- a) Berechnen Sie zunächst die Kapazität pro Länge $C_{l,VPP}$ in $\text{fF}/\mu\text{m}$ zwischen den Fingern 1 und 2 unter Vernachlässigung der Streufelder.
- b) Durch den Einfluss der Streufelder ist die effektiv wirksame Kapazität zwischen den Fingern um den Faktor 1,7 größer, als die im vorherigen Aufgabenpunkt berechnete. Wie groß ist die Flächenkapazität $C_{\square,VPP}$ in $\text{fF}/\mu\text{m}^2$?

Hinweis: Verwenden Sie bei ihrer Berechnung eine Struktur mit jeweils 4 Fingern an den Knoten A und B!

- c) Wieviele Finger müssen mit den Anschlüssen A und B verbunden sein, damit deren Eingangskapazitäten identisch sind?

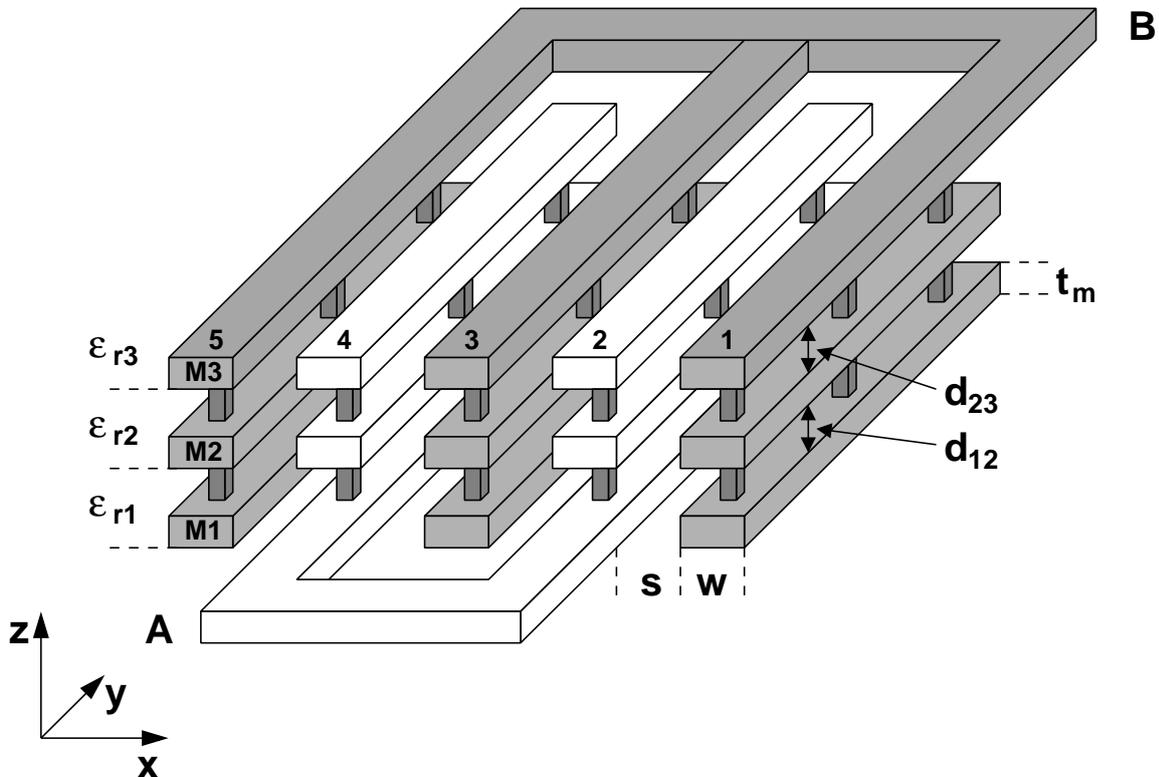


Abb. 1.3: Aufbau einer Kapazität aus vertikalen Metalllagen

Aufgabe 2: pn-Diode (20 Punkte)

In der folgenden Aufgabe soll eine Silizium-Diode charakterisiert werden. Die Diode wird bei Raumtemperatur betrieben. Es hat sich Störstellenschöpfung eingestellt.

Vorgaben:

Donatordotierung	$N_D = 5 \cdot 10^{16} \frac{1}{\text{cm}^3}$
Akzeptordotierung	$N_A = 2 \cdot 10^{16} \frac{1}{\text{cm}^3}$
Fläche der Diode	$A = 500 \mu\text{m}^2$
Transitzeit	$\tau_t = 10 \text{ ns}$
relative Dielektrizitätskonstante von Silizium	$\epsilon_r = 11,9$
Dielektrizitätskonstante in Vakuum	$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$
Temperaturspannung	$U_T = 26 \text{ mV}$
Elementarladung	$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$
intrinsische Dichte	$n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \frac{1}{\text{cm}^3}$

2.1 Gegeben sei ein abrupter pn-Übergang im thermodynamischen Gleichgewicht.

- Bestimmen Sie die Diffusionsspannung U_D !
- Bestimmen Sie die Ausweitung der RLZ im n- sowie im p-Gebiet und ergänzen Sie quantitativ den Verlauf der RLZ in Abbildung 2.2 a)! Wählen Sie für die y-Achse eine geeignete Skalierung!
- Berechnen Sie die maximale Feldstärke E_{Max} am pn-Übergang und ergänzen Sie den Verlauf der Feldstärke in Abbildung 2.2 b)!
- Skizzieren Sie in Abbildung 2.3 a) den Verlauf des Potentials über den pn-Übergang im thermodynamischen Gleichgewicht und bei einer Flussspannung von $U_F = 0,2 \text{ V}$! Tragen Sie Diffusionsspannung und die Flussspannung ein!
- Bestimmen Sie Ladungsträgerdichten n_{n0}, n_{p0}, p_{n0} und p_{p0} und zeichnen Sie den Verlauf der Trägerdichten in Abbildung 2.3 b) ein!

2.2 Die Diode sei nun wie in Abbildung 2.1 beschaltet. An der Diode fällt eine Flussspannung $U_F = 0,65 \text{ V}$ ab. Es gilt $U_G = 5 \text{ V}$ und $R_G = 2,9 \text{ k}\Omega$.

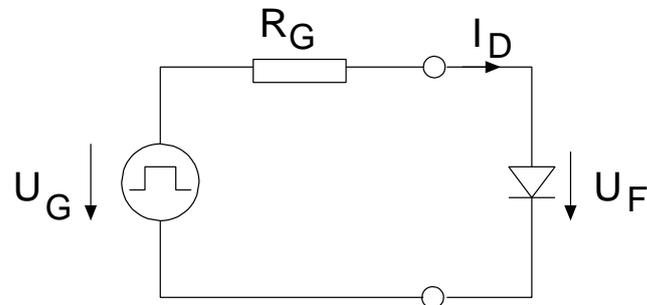


Abb. 2.1: Beschaltung der Diode

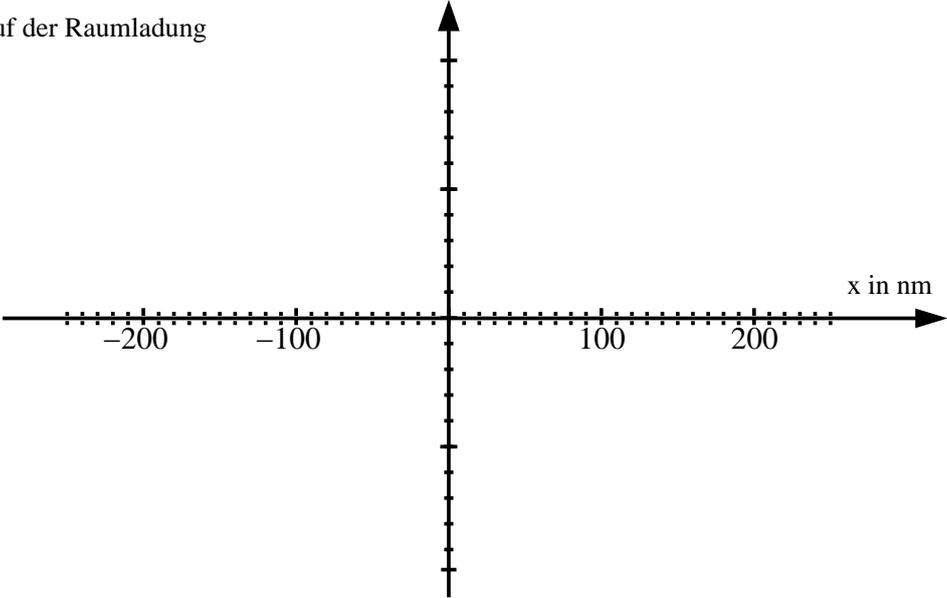
- Geben Sie die Formel zur Sperrschichtkapazität an! Bestimmen Sie C_{sp0} und C_{sp} bei der gegebenen Flussspannung!
- Berechnen Sie die Diffusionskapazität! Wie groß ist der Sperrsättigungsstrom I_S ?

2.3 Die Spannung U_G wird jetzt von 5 V auf -10 V geschaltet.

- Berechnen Sie die Speicherzeit t_s und die Abfallzeit t_f !
Hinweis: Gehen Sie davon aus, dass die mittlere Sperrschichtkapazität $\overline{C_{sp}} = C_{sp}(-5 \text{ V})$ entspricht.
- Welchen Wert nimmt die Diffusionskapazität an?



a) Verlauf der Raumladung



b) Verlauf der Feldstärke

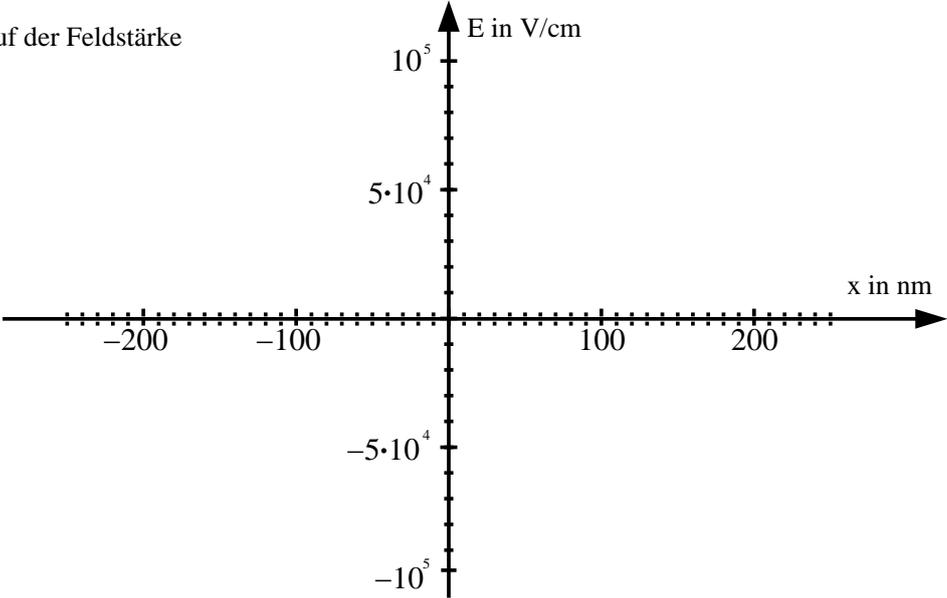


Abb. 2.2: pn-Übergang einer Diode

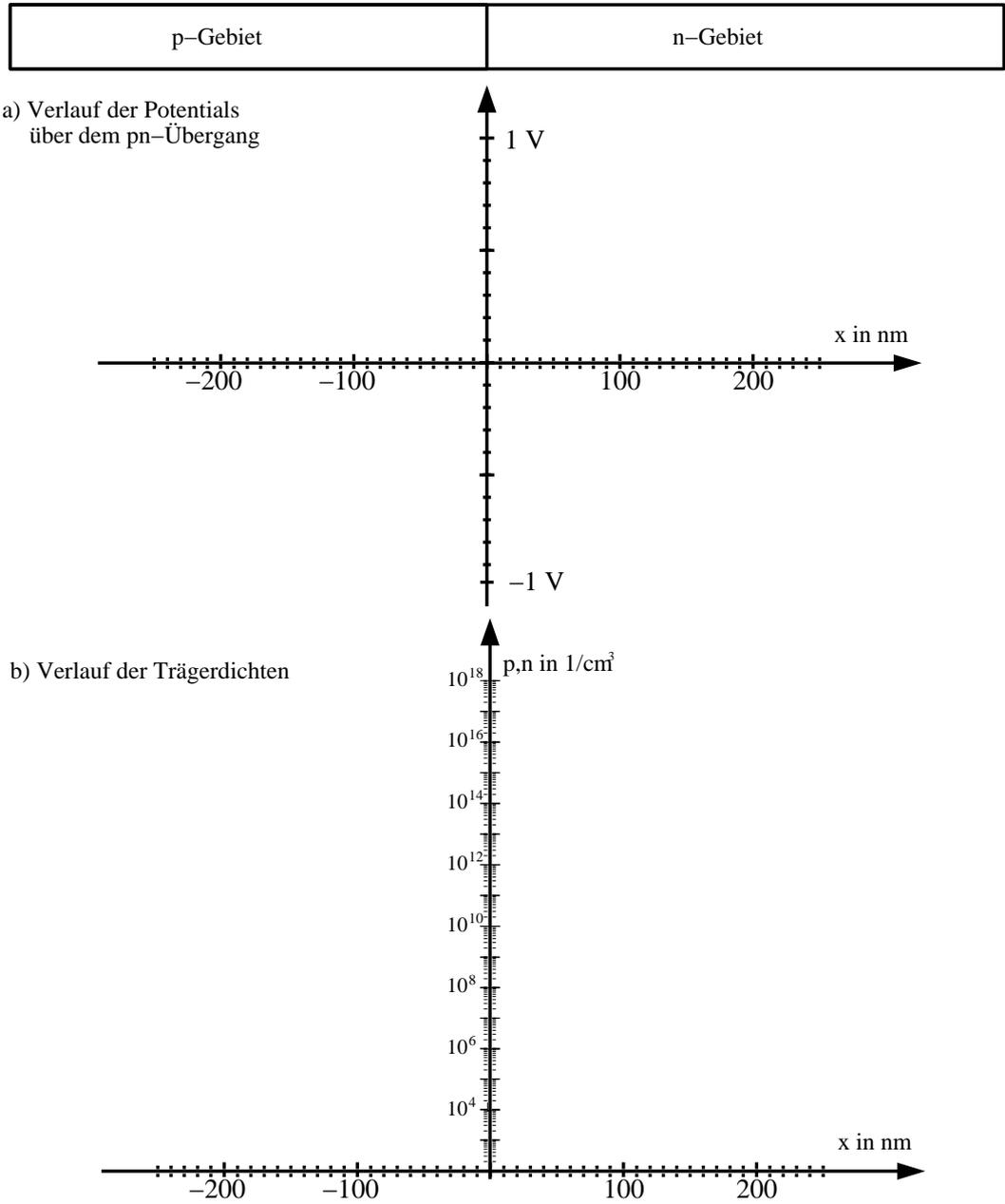


Abb. 2.3: pn-Übergang einer Diode

Aufgabe 3: Bipolar-Transistor (20 Punkte)

Falsche Kreuze bei Multiple-Choice Fragen führen zu Punktabzug!

3.1 Grundlagen des npn-Transistors

- a) Der Basisstrom I_B eines npn-Transistors im normal-aktiven Bereich ist hauptsächlich ein
- Elektronenstrom
 - Löcherstrom
- b) Ordnen Sie die Dotierkonzentrationen der drei Gebiete eines typischen npn-Transistors ihrer Größe nach. Verwenden Sie dafür die Bezeichnung $N_{A,X}$, $N_{D,X}$ mit $X = E, B$ oder C .

>
>

- c) Geben Sie zwei Gründe für die in Aufgabe 3.1 b) getroffene Anordnung an!

Gegeben sei ein npn-Transistor in Emitter-Schaltung (s. Abb. 3.1).

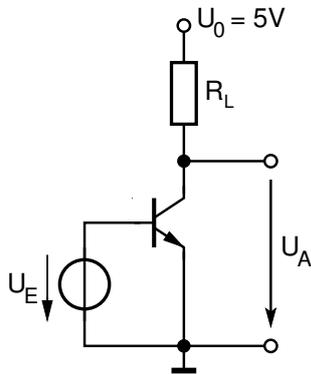


Abb. 3.1: Emitter-Schaltung

- 3.2 a) Zeichnen Sie die Arbeitsgerade für $R_L = 1 \text{ k}\Omega$ in das Ausgangskennlinienfeld (s. Abb. 3.2) ein und bestimmen Sie den Arbeitspunkt (U_{CE} , I_C) für einen Basisstrom von $I_B = 40 \text{ }\mu\text{A}$.
- b) Bestimmen Sie die Basis-Emitterspannung U_{bE} , die Stromverstärkung β_0 und die Early-Spannung für den Arbeitspunkt ($I_S = 70 \cdot 10^{-18} \text{ A}$, $U_T = 26 \text{ mV}$).
- c) Darf der Transistor in diesem Arbeitspunkt betrieben werden, wenn seine maximale Verlustleistung $P_V = 180 \text{ mW}$ beträgt? (Begründung durch Rechnung!)

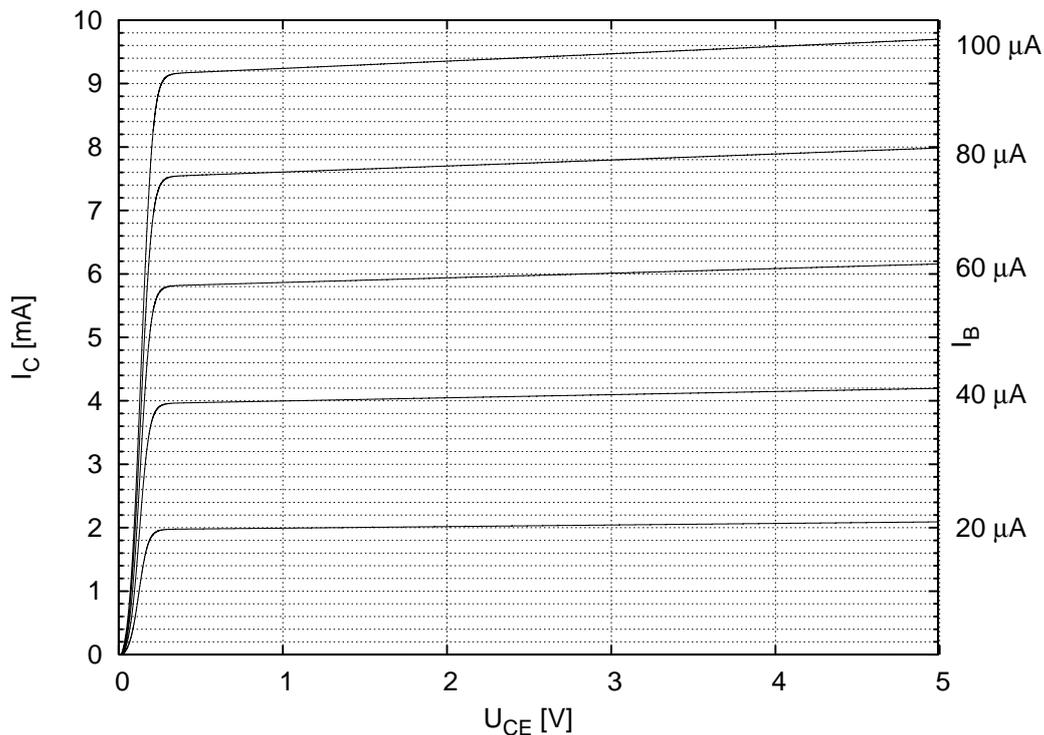


Abb. 3.2: Ausgangs-Kennlinienfeld des npn-Transistors

- 3.3 a) Zeichnen Sie das Kleinsignal-Ersatzschaltbild nach Giacoletto für die Emitterschaltung aus Abbildung 3.1 und benennen Sie die Elemente (z.B. R_L = Lastwiderstand).
 b) Berechnen Sie die Steuersteilheit, den Ausgangsleitwert und den Eingangsleitwert!
- 3.4 Geben Sie die Spannungsverstärkung v_u der Emitterschaltung an. Vernachlässigen Sie hierfür sämtliche Kapazitäten im Ersatzschaltbild, den Basis-Bahnwiderstand, sowie den Rückwirkungsleitwert.
- 3.5 Für welchen der drei Lastwiderstände R_L ist die Spannungsverstärkung $|v_u|$ am größten ($I_B = 40 \mu A$)? Begründen Sie Ihre Antwort (keine Zahlenwerte)!

$R_L = 800 \Omega$

$R_L = 1 \text{ k}\Omega$

$R_L = 1,5 \text{ k}\Omega$

Hinweis: Zeichnen Sie für beide Widerstände eine Arbeitsgerade in das Ausgangskennlinienfeld ein. Betrachten Sie genau den Arbeitspunkt!

- 3.6 Vernachlässigen Sie im Folgenden den Ausgangsleitwert! Bestimmen Sie die maximale Spannungsverstärkung $|v_u|$, die mit diesem Transistor bei $U_0 = 5 \text{ V}$ möglich ist. Es seien I_C und R_L sowie der Transistor frei wählbar. Formen Sie dazu den Ausdruck für v_u aus Aufgabe 3.4 so um, dass $v_u = f(U_0, U_{CE}, U_T)$ ist, indem Sie den Kollektorstrom in Abhängigkeit von R_L ausdrücken. Als Grenze für den Sättigungsbereich gilt $U_{CE} = U_{bE} = 800 \text{ mV}$ ($U_T = 26 \text{ mV}$).

Aufgabe 4: MOSFET (20 Punkte)

4.1 Gegeben sei ein n-Kanal MOSFET mit der Schwellspannung $U_{th,n} = 500 \text{ mV}$.

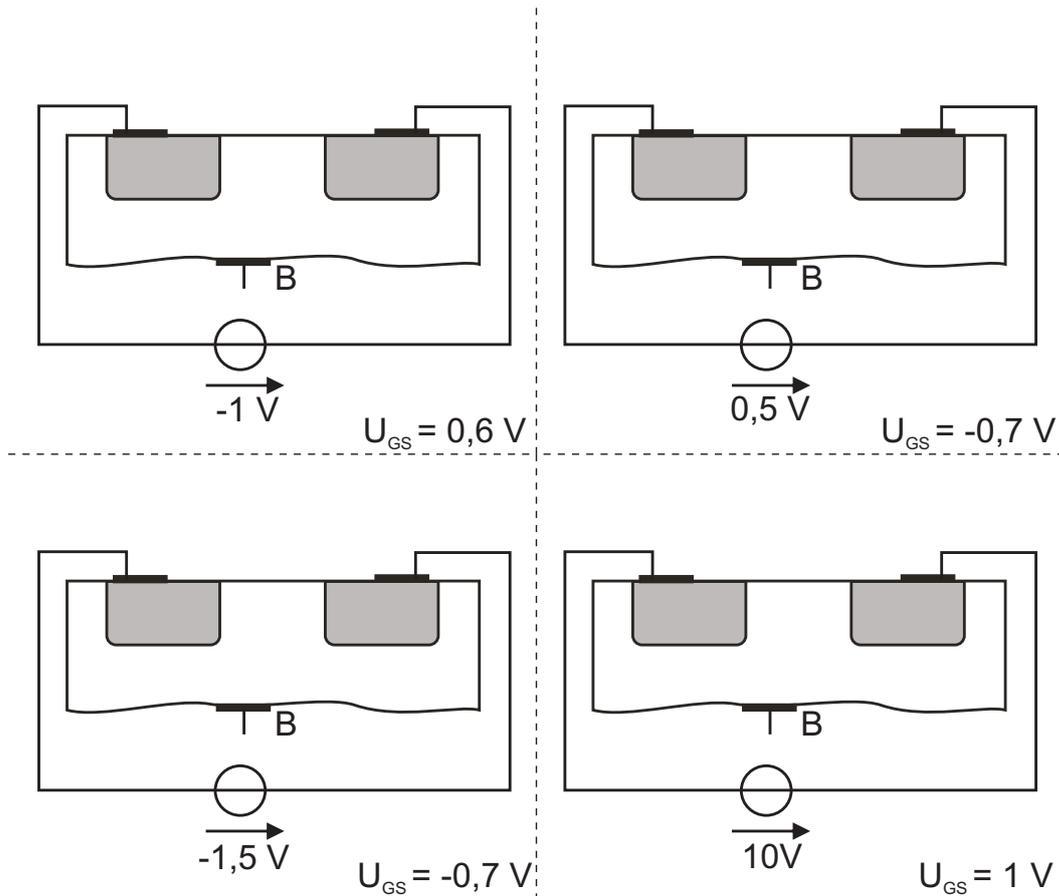


Abb. 4.1: Querschnitte eines MOSFET

- Ergänzen Sie die Querschnitte in Abb. 4.1 jeweils um Dotierungen (n,p) sowie fehlende Elemente und bezeichnen Sie die Anschlüsse (S, G, D)!
- Kontaktieren Sie das Bulk (B) derart, dass keine leitende parasitäre Diode entstehen kann!
- Rechts unter den Querschnitten finden Sie Angaben für das zugehörige U_{GS} . Zeichnen sie jeweils diese Spannung sowie den Verlauf der Ladungsträgerkonzentration im Kanalbereich qualitativ ein, falls ein Kanal existiert!

4.2 In Abb. 4.2 ist eine zu einem MOSFET gehörige Kennlinie gegeben. Die Kanallängenmodulation sei in den folgenden Aufgabenteilen zu vernachlässigen.

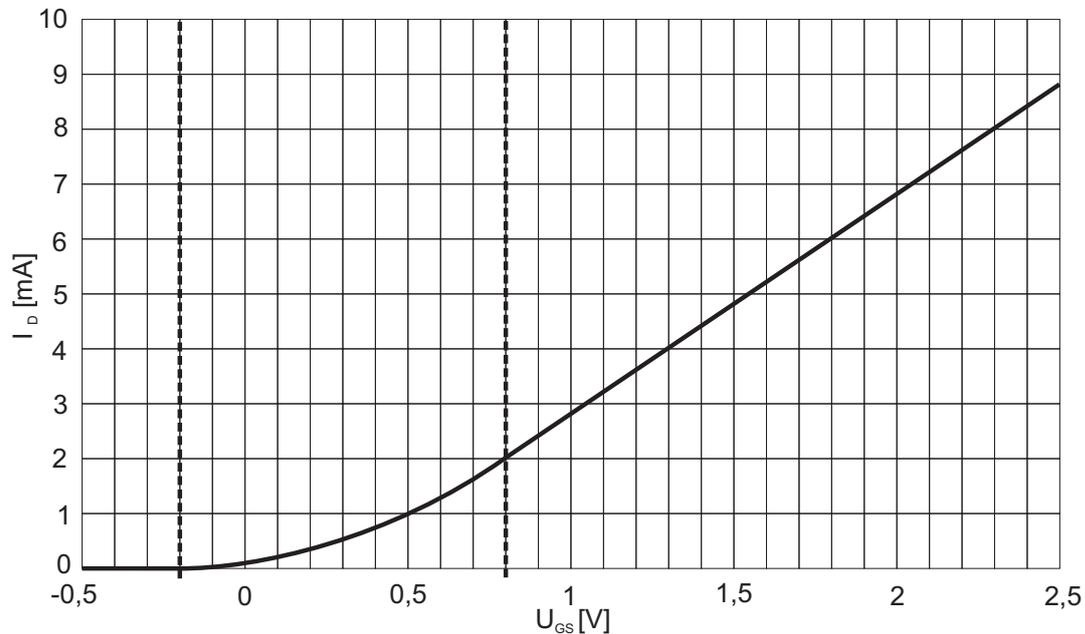


Abb. 4.2: Kennlinie eines MOSFET

- a) Um was für einen Typ Kennlinie handelt es sich? Kennzeichnen Sie, um welche Arbeitsbereiche des Transistors es sich in den bereits durch gestrichelte Linien unterteilten Bereichen handelt!
- b) Um was für einen Transistor handelt es sich exakt (Leitungstyp und Kanaltyp)?
- c) Welche Ladungsträger sind bei diesem Bauelement für den Stromtransport verantwortlich?
- d) Berechnen Sie die Spannung U_{DS} sowie die Transistorkenngröße k !
- e) Konstruieren Sie die Kennlinie für $U'_{DS} = U_{DS} - 600 \text{ mV}$ und zeichnen Sie diese in Abb. 4.2 ein!

4.3 Gegeben sei nun die Schaltung in Abbildung 4.3. Der Transistor befindet sich im Abschnürbereich.

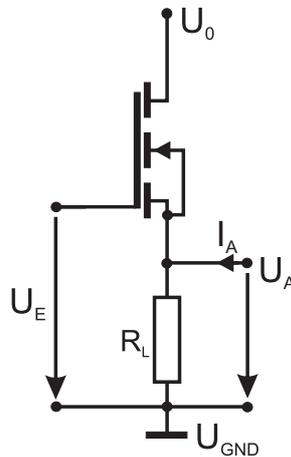


Abb. 4.3: MOSFET Grundschaltung

Folgende Angaben zum abgebildeten MOSFET sind bekannt:

Kleinsignal-Steilheit	$g_m = 20 \text{ mS}$
Lastwiderstand	$R_L = 200 \Omega$

- Beschriften Sie die Transistoranschlüsse (G,D,S,B) in Abb. 4.3 und tragen Sie U_{GS} ein!
- Um welche der Transistorgrundschaltungen handelt es sich in der Abbildung?
- Zeichnen Sie das Kleinsignal-Ersatzschaltbild der Gesamtschaltung ohne Kapazitäten!
- Wie ist der Kleinsignal-Ausgangswiderstand r_a einer Schaltung mathematisch definiert? Geben Sie sowohl die Zusammenhänge unter Verwendung der Großsignalgrößen als auch der Kleinsignalgrößen an!
- Berechnen Sie allgemein und numerisch den Kleinsignal-Ausgangswiderstand der Gesamtschaltung unter Vernachlässigung aller Kapazitäten! Der Rechenweg muss nachvollziehbar sein.

Aufgabe 1: Passive Bauelemente (20 Punkte)

1.1 Ordnen Sie die fünf Kondensator-Typen nach ihrer Volumen-Kapazität F/cm^3 !

1. Aluminium-Elektrolyt-Kondensator
2. Keramik-Kondensator
3. Doppelschicht-Kondensator
4. Tantal-Elektrolyt-Kondensator
5. Kunststoff-Folien-Kondensator

niedrige Kapazität ② ... ⑤ ... ① ... ④ ... ③ hohe Kapazität

1.2

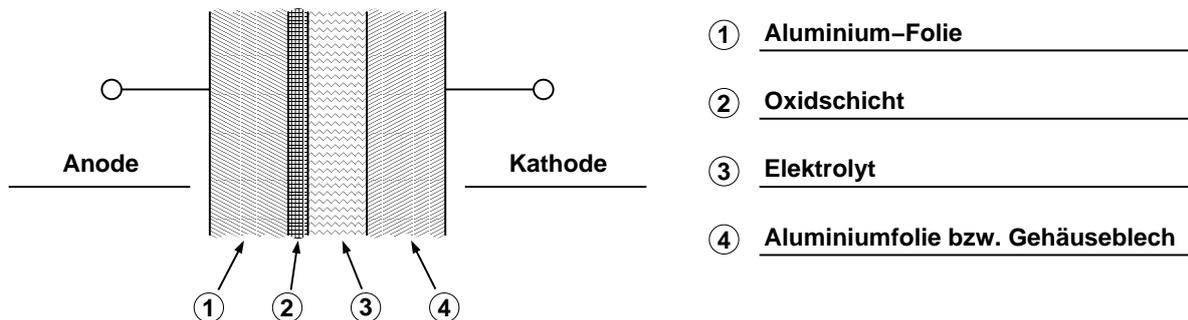


Abb. 1.1: Schematischer Aufbau eines Kondensators

- a) Aluminium-Elektrolyt-Kondensator
- b) siehe Abb. 1.1
- c) siehe Abb. 1.1
- d) Zwischen dem Elektrolyt (3) und der Kathode (4) muss eine weitere Oxidschicht angebracht werden.
- e) Durch das Aufrauen wird die Oberfläche der Anode größer und somit auch die Kapazität des Kondensators.
- f) Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren werden häufig zur Spannungsglättung (Stabilisierung) in Geräten mit niedriger Betriebsfrequenz eingesetzt (z.B. Netzgeräte, Unterhaltungselektronik).

- g) - Ladungsverluste durch Restströme
 - Verluste durch Elektrolytwiderstand
 - begrenzte Lebensdauer (Eintrocknen)
 - $\epsilon_r \approx 8$ relativ gering
 - temperaturabhängig

1.3 a) $C_{\text{HPP}} = C_{12} + C_{23} = \epsilon_0 \epsilon_{r1} \frac{A}{d_{12}} + \epsilon_0 \epsilon_{r2} \frac{A}{d_{23}} = C_{\square, \text{HPP}} \cdot A$
 $C_{\square, \text{HPP}} = \epsilon_0 \left(\frac{\epsilon_{r1}}{d_{12}} + \frac{\epsilon_{r2}}{d_{23}} \right) = 0,17 \text{ fF}/\mu\text{m}^2$

b) $x = \frac{100 \cdot C'_{\square, \text{HPP}}}{C_{\square, \text{HPP}}} \quad C'_{\square, \text{HPP}} = \epsilon_0 \left(\frac{\epsilon_{r1}}{1,2 \cdot d_{12}} + \frac{\epsilon_{r2}}{1,2 \cdot d_{23}} \right) = \frac{C_{\square, \text{HPP}}}{1,2}$
 $\Rightarrow x = \frac{100}{1,2} = 83,3$
 \Rightarrow Die Kapazität verringert sich um 16,7 %!

- c) Wenn Streufelder vernachlässigt werden können, ist die Kapazität unabhängig von der Dicke der Kondensatorplatten!
- d) Um eine symmetrische Kapazität C mit der HPP-Struktur zu erhalten, werden 2 HPP-Kondensatoren mit einer Kapazität von $C/2$ antiparallel verschaltet. Dabei wird Anschluss A des ersten Kondensators mit Anschluss B des zweiten verbunden und umgekehrt.

1.4 a) $C_{\text{VPP}} = C_{M1} + C_{M2} + C_{M3} = 3 \cdot \epsilon_0 \epsilon_r \frac{t_{\text{ml}}}{s} = C_{\text{l, VPP}} \cdot l$
 $\Rightarrow C_{\text{l, VPP}} = 0,18 \text{ fF}/\mu\text{m}$

- b) Die Flächenkapazität ist auf die xy -Ebene bezogen. Bei $3 \mu\text{m}$ in x -Richtung ergeben sich 8 Finger, die jeweils $1 \mu\text{m}$ in y -Richtung betragen sollen. Daher ergeben sich 7 parallele Kapazitäten $C_{\text{l, VPP}}$ zwischen den Anschlüssen A und B. Die Flächenkapazität ergibt sich zu:

$$C_{\text{VPP}} = C_{\square, \text{VPP}} \cdot x \cdot y = C_{\square, \text{VPP}} \cdot 3 \mu\text{m} \cdot 1 \mu\text{m} = 7 \cdot 1,7 \cdot C_{\text{l, VPP}} \cdot 1 \mu\text{m}$$

$$\Rightarrow C_{\square, \text{VPP}} = \frac{1}{3 \mu\text{m}} \cdot 7 \cdot 1,7 \cdot C_{\text{l, VPP}} = 0,714 \text{ fF}/\mu\text{m}^2$$

- c) Die Anzahl der Finger, die mit dem Anschluss A verbunden sind, muss gleich der Anzahl der Finger sein, die mit B verbunden sind.

Aufgabe 2: pn-Diode (20 Punkte)

2.1 a) Bestimmung der Diffusionsspannung U_D

$$\begin{aligned} U_D &= U_T \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \\ &= 0,757 \text{ V} \end{aligned}$$

b) Bestimmung der Weiten w , w_n und w_p :

$$\begin{aligned} w &= w_p + w_n \\ &= \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon}{e} U_D \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)} \\ &= 264,1 \text{ nm} \end{aligned}$$

Daraus folgt für w_p :

$$\begin{aligned} w_p &= \frac{N_D}{N_A + N_D} \cdot w \\ &= 188,6 \text{ nm} \end{aligned}$$

und für w_n

$$w_n = 75,5 \text{ nm}$$

Skalierung der y-Achse:

1. Möglichkeit:

$$\begin{aligned} \rho_n &= N_D \cdot e \\ &= 8,01 \cdot 10^{-3} \frac{\text{As}}{\text{cm}^3} \\ \rho_p &= -N_A \cdot e \\ &= -3,2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{As}}{\text{cm}^3} \end{aligned}$$

2. Möglichkeit:

$$\begin{aligned} \frac{\rho_p}{e} &= N_D \\ &= 5 \cdot 10^{16} \frac{1}{\text{cm}^3} \\ \frac{\rho_p}{e} &= -N_A \cdot e \\ &= -2 \cdot 10^{16} \frac{1}{\text{cm}^3} \end{aligned}$$

c) Berechnung der maximalen Feldstärke:

$$\begin{aligned} E_{\max} &= -\frac{e \cdot N_A}{\epsilon} w_p \\ &= -57364,9 \frac{\text{V}}{\text{cm}} \end{aligned}$$

d) siehe Abb. 2.3 a)

e) Berechnung der Ladungsträgerverteilungen:

$$n_{n0} = N_D$$

$$p_{p0} = N_A$$

$$\begin{aligned} p_{n0} &= \frac{n_i^2}{N_D} \\ &= 4500 \frac{1}{\text{cm}^3} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_{p0} &= \frac{n_i^2}{N_A} \\ &= 11250 \frac{1}{\text{cm}^3} \end{aligned}$$

2.2 a)

$$C_{\text{sp}}(U) = \frac{C_{\text{sp}0}}{\sqrt{1 + \frac{U_{\text{sp}}}{U_D}}}$$

$$\begin{aligned} C_{\text{sp}0} &= \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{w} \\ &= 199,5 \text{ fF} \end{aligned}$$

$$C_{\text{sp}}(0,65 \text{ V}) = 530,3 \text{ fF}$$

b)

$$C_D = \tau_t \cdot G_D$$

mit:

$$\begin{aligned} G_D &= \frac{I_D}{U_T} \\ &= \frac{\frac{U_G - U_F}{R_G}}{U_T} \end{aligned}$$

Folgt daraus: $C_D = 576,9 \text{ pF}$. Für I_S gilt:

$$\begin{aligned} I_S &= \frac{I_D}{e^{\frac{U_F}{U_T}} - 1} \\ &= 20,8 \text{ fA} \end{aligned}$$

2.3 a)

$$t_s = \tau_t \cdot \ln \left(1 + \frac{I_F}{I_R} \right)$$

mit $I_F = \frac{U_G - U_F}{R_G} = 1,5 \text{ mA}$ und $I_R = \frac{|U_G| + U_F}{R_G} = 3,67 \text{ mA}$ folgt: $t_s = 3,43 \text{ ns}$.
Es gilt:

$$t_f = R_G \overline{C_{sp}(-5 \text{ V})} \ln(10)$$

Zur Berechnung der Ausschaltzeit t_f wird zunächst $\overline{C_{sp}(-5 \text{ V})}$ berechnet:

$$\begin{aligned} \overline{C_{sp}(-5 \text{ V})} &= \frac{199,5 \text{ fF}}{\sqrt{1 + \frac{5 \text{ V}}{0,757 \text{ V}}}} \\ &= 72,34 \text{ fF} \end{aligned}$$

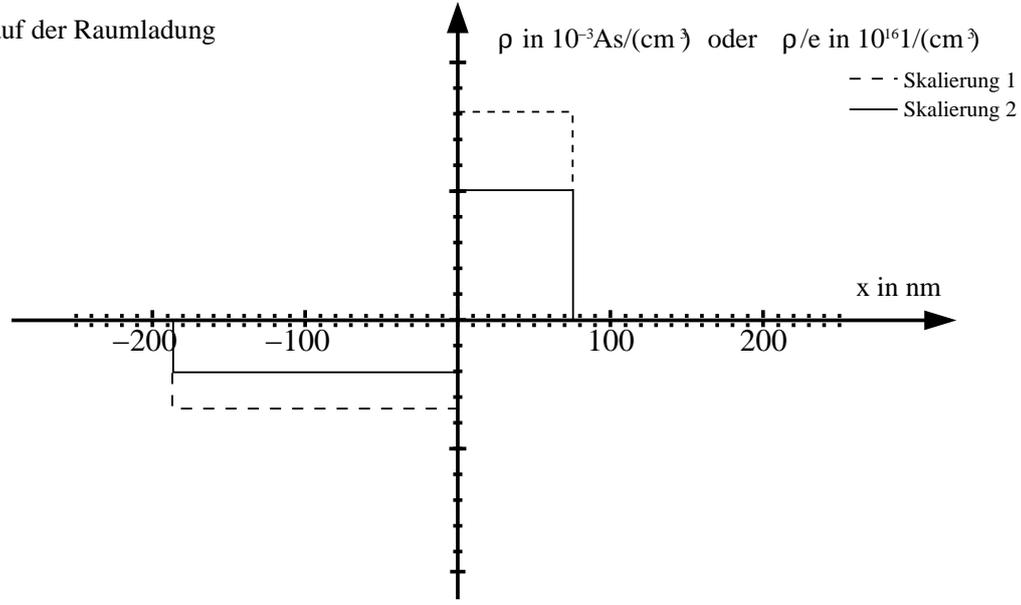
Daraus folgt für die Ausschaltzeit:

$$\begin{aligned} t_f &= 2900 \Omega \cdot 72,34 \text{ fF} \cdot \ln 10 \\ &= 483 \text{ ps} \end{aligned}$$

- b) Die Diffusionskapazität nähert sich dem Wert 0 F, da im gesperrten Zustand keine Diffusion stattfindet.



a) Verlauf der Raumladung



b) Verlauf der Feldstärke

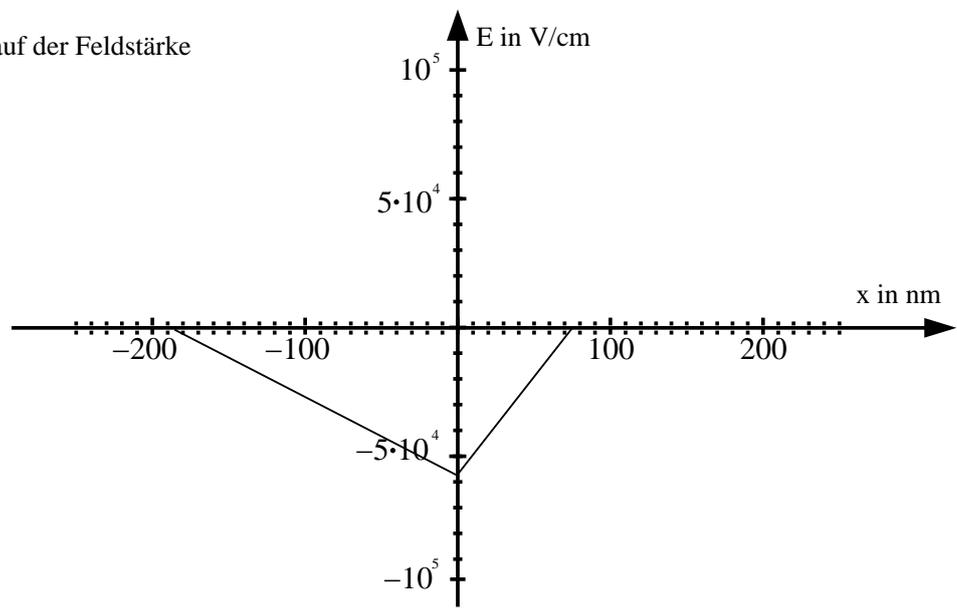


Abb. 2.2: pn-Übergang einer Diode

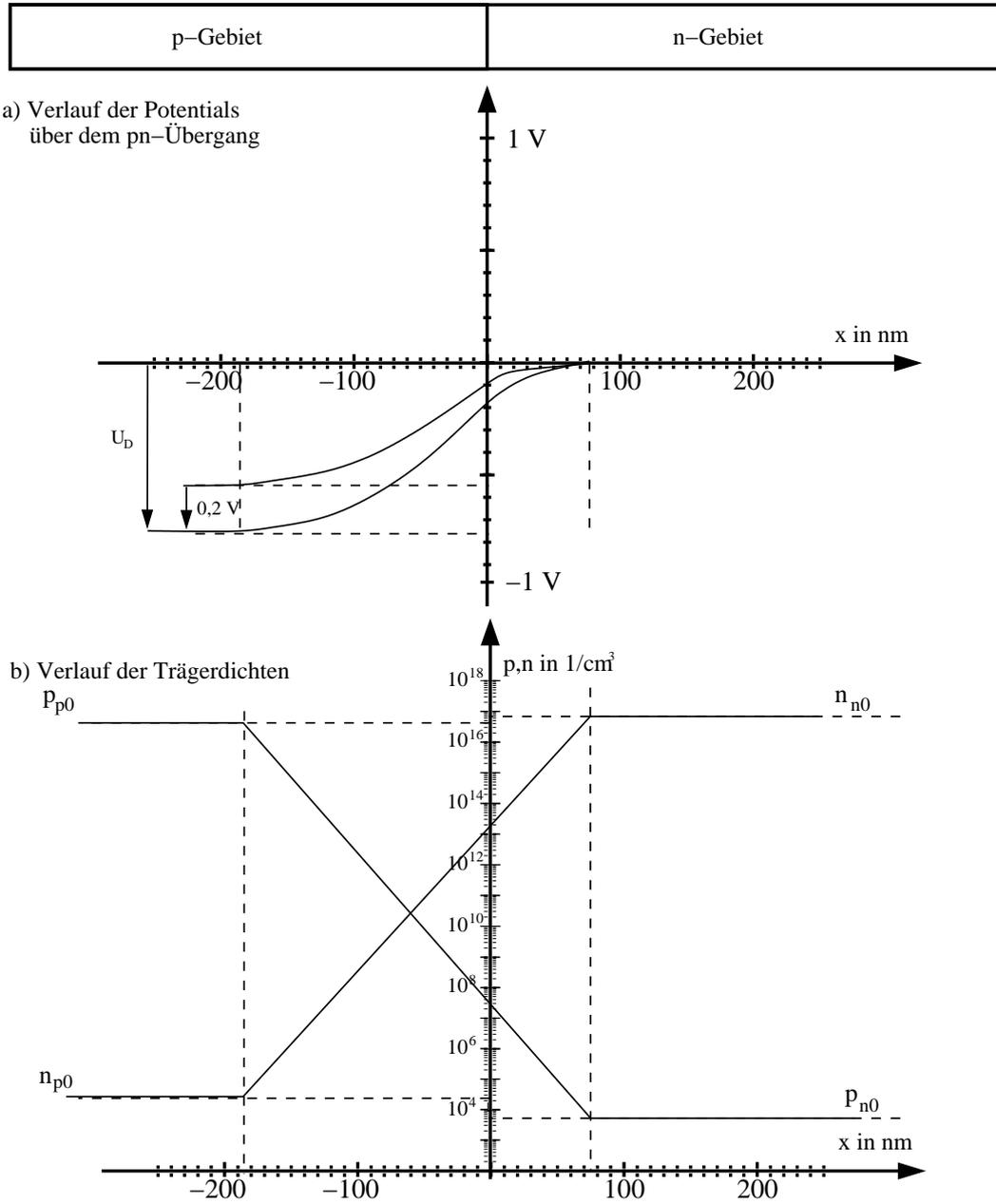


Abb. 2.3: pn-Übergang einer Diode

Aufgabe 3: Bipolar-Transistor (20 Punkte)

3.1 Grundlagen des npn-Transistors

- a) Der Basisstrom I_B eines npn-Transistors im normal-aktiven Bereich ist hauptsächlich ein
- Elektronenstrom
 - Löcherstrom
- b) $N_{D,E} > N_{A,B} > N_{D,C}$
- c) • $N_{D,E} > N_{A,B}$, da mit $B \propto \frac{N_{D,E}}{N_{A,B}}$ eine große Stromverstärkung erreicht wird. Eine niedrige Dotierung der Basis reduziert den Löcherstrom, der im normal-aktiven Bereich den Basisstrom I_B ausmacht.
- $N_{A,B} > N_{D,C}$ Mit diesem Verhältnis wird der Early-Effekt reduziert. Somit wird die Ausbreitung BC-Raumladungszone in die Basis reduziert.

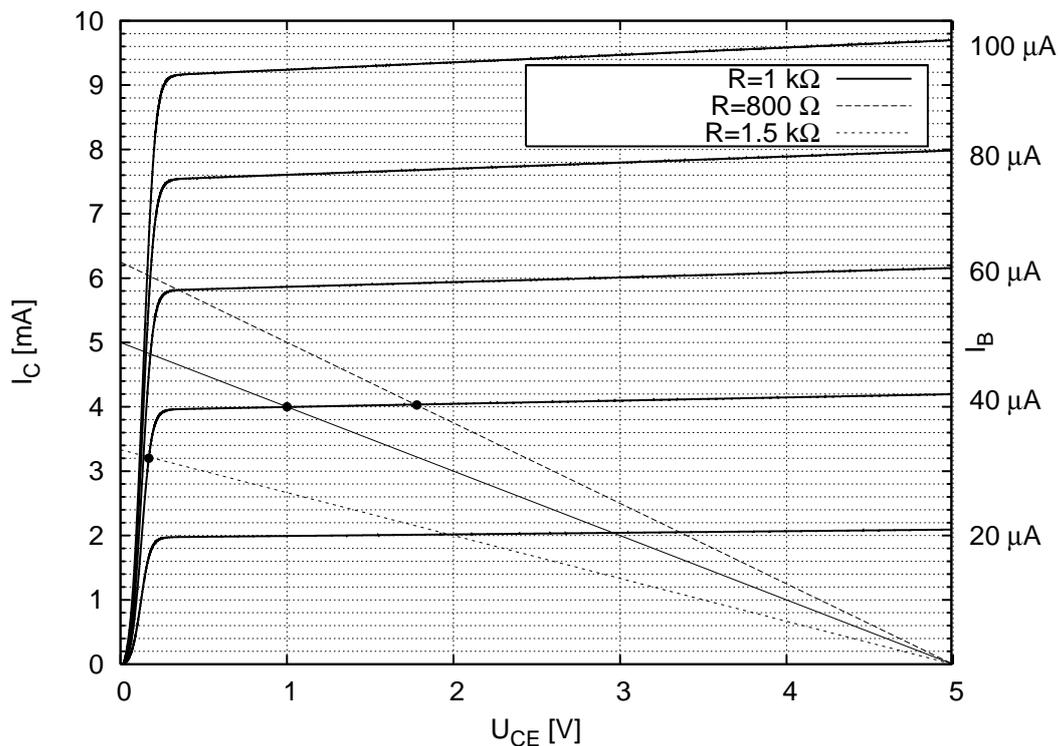


Abb. 3.1: Ausgangs-Kennlinienfeld des npn-Transistors

3.2 a) s. Abb. 3.1

$$U_{CE} = 1 \text{ V}$$

$$I_C = 4 \text{ mA}$$

b)

$$U_{bE} = U_T \ln\left(\frac{I_C}{I_S} + 1\right) \approx 26 \text{ mV} \cdot \ln\left(\frac{4 \text{ mA}}{70 \cdot 10^{-18} \text{ A}}\right) = 824 \text{ mV}$$

$$\beta_0 = \frac{i_C}{i_B} = \frac{4 \text{ mA}}{40 \mu\text{A}} = 100$$

$$U_{\text{early}} = 4 \text{ mA} \frac{4 \text{ V}}{0,2 \text{ mA}} - 1 \text{ V} = 79 \text{ V}$$

c)

$$P_V = I_C U_{CE} = 4 \text{ mW} < P_{V,\text{max}} = 180 \text{ mW}$$

Der Arbeitspunkt ist zulässig.

- 3.3 a)
- | | |
|-----------------------|----------|
| Basisbahnwiderstand | R_B |
| Diffusionskapazität | C_{bE} |
| Eingangsleitwert | G_{bE} |
| Sperrschichtkapazität | C_{bC} |
| Steuersteilheit | g_m |
| Ausgangsleitwert | G_{CE} |
| Rückwirkungsleitwert | G_{bC} |

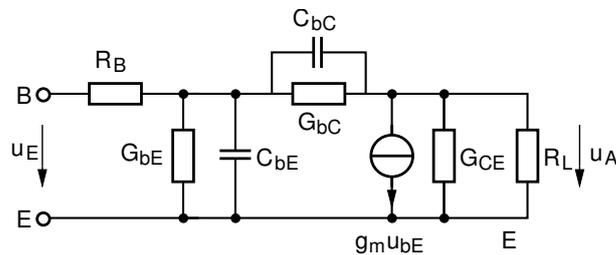


Abb. 3.2: Giacoletto Kleinsignal-ESB

b)

$$g_m = \frac{I_C}{U_T} = \frac{4 \text{ mA}}{26 \text{ mV}} = 153 \text{ mS}$$

$$G_{CE} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}} = \frac{0,2 \text{ mA}}{4 \text{ V}} = 50 \mu\text{S}$$

$$G_{bE} = \frac{I_B}{U_T} = \frac{g_m}{\beta_0} = 1,53 \text{ mS}$$

3.4

$$u_A = -g_m \cdot u_E \cdot \left(R_L \parallel \frac{1}{G_{CE}}\right)$$

$$v_u = -g_m \cdot \left(R_L \parallel \frac{1}{G_{CE}}\right) = -146$$

3.5 Die Spannungs-Verstärkung $|v_u|$ ist proportional zu R_L sofern sich der Transistor nicht in Sättigung befindet. Für $R_L = 1,5 \text{ k}\Omega$ ist der Transistorarbeitspunkt im Sättigungsbereich. Aus diesem Grund gibt $R_L = 1 \text{ k}\Omega$ eine größte Spannungs-Verstärkung.

$R_L = 800 \Omega$

$R_L = 1 \text{ k}\Omega$

$R_L = 1,5 \text{ k}\Omega$

3.6

$$\begin{aligned} v_u &= -g_m \cdot R_L = -\frac{I_C}{U_T} \cdot R_L \\ &= -\frac{U_{RL}}{U_T} = -\frac{U_0 - U_{CE}}{U_T} \end{aligned}$$

Eine maximale Spannungs-Verstärkung erhält man für ein minimales U_{CE} , was in diesem Fall $U_{CE,\min} \approx U_{bE}$ ist. Dieses Ergebnis ist unabhängig von der Stromverstärkung des Transistors.

$$v_{u,\max} = -\frac{U_0 - U_{bE}}{U_T} = -162$$

Aufgabe 4: MOSFET (20 Punkte (CPO) bzw. 15 Punkte)

4.1 $U_{th,n} = 500 \text{ mV}$

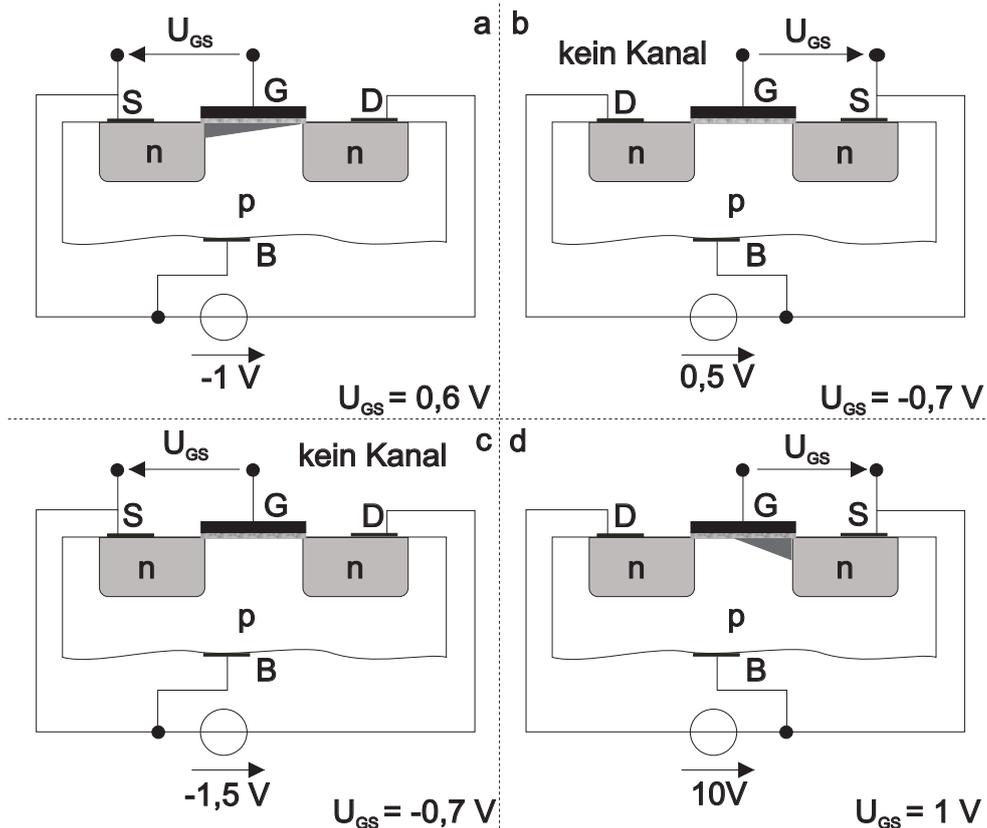


Abb. 4.1: Querschnitte eines MOSFET

- a) Siehe Abb. 4.1. Fehlende Elemente: Gateoxid und Anschluss.
MOSFETs sind vom Aufbau her prinzipiell symmetrisch. Folglich bestimmt die angelegte Spannung darüber, welche der Zonen die Ladungsträger-Quelle bzw. Source und die Ladungsträger-Senke bzw. Drain darstellt. N-Kanal \rightarrow Elektronenleitung \rightarrow Source bei niedrigerem Potential.
- b) Siehe Abb. 4.1.
- c) Siehe Abb. 4.1. Folgende Berechnungen dienen dazu, die Zusammenhänge zu erläutern. Sie waren kein Bestandteil der Aufgabenstellung.
- a) $U_{DS,sat} = U_{GS} - U_{th} \Rightarrow U_{DS,sat} = 0,1 \text{ V} < U_{DS} = 1 \text{ V} \Rightarrow$ Abschnürbereich
- b) $U_{GS} < U_{th} \Rightarrow$ Es existiert kein Kanal.
- c) $U_{GS} < U_{th} \Rightarrow$ Es existiert kein Kanal.
- d) $U_{DS,sat} = U_{GS} - U_{th} \Rightarrow U_{DS,sat} = 0,5 \text{ V} \ll U_{DS} = 10 \text{ V} \Rightarrow$ Abschnürbereich

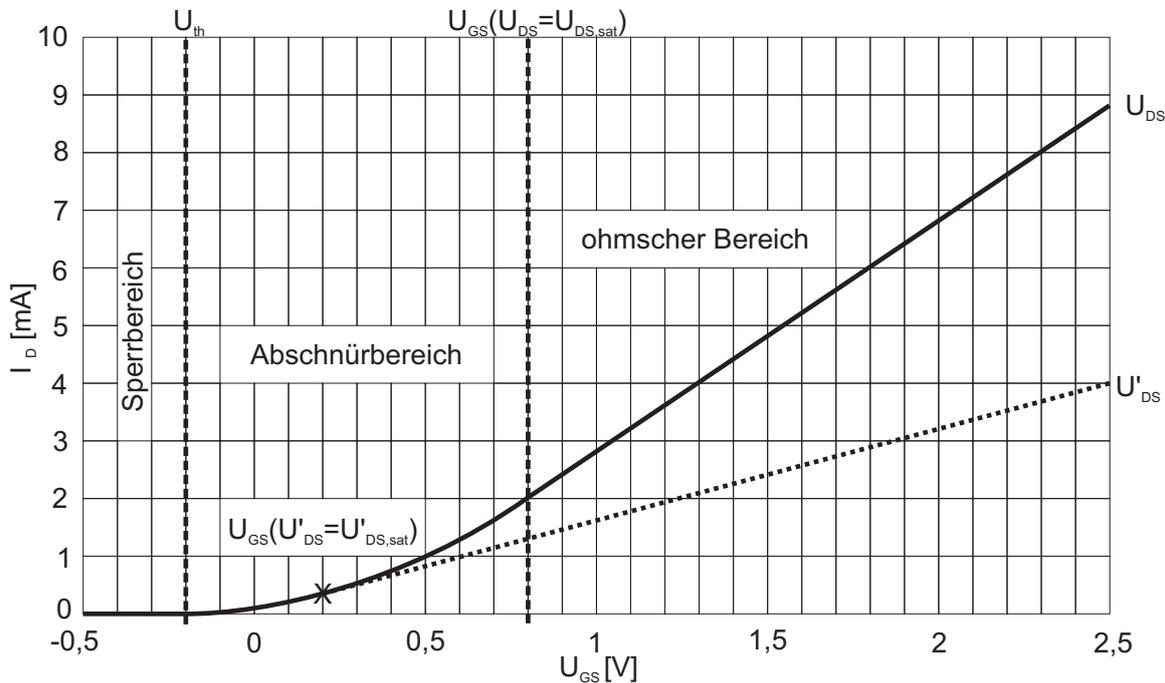


Abb. 4.2: Kennlinie eines MOSFET

4.2 a) Steuerkennlinie. Rest siehe Abb. 4.2.

b) Leitungstyp: Selbstleitend (Verarmungstyp). Kanaltyp: n-Kanal MOSFET.

c) (nur CPO) Elektronen.

d) (CPO) / c) (DPO)

$$U_{GS}(U_{DS,sat}) = 0,8 \text{ V}$$

$$U_{th} = -0,2 \text{ V}$$

$$U_{DS,sat} = U_{GS} - U_{th} \Rightarrow U_{DS} = 1 \text{ V}$$

$U_{DS} = U_{DS,sat}$ kann im Abschnürpunkt problemlos bestimmt werden und ist als Parameter der Steuerkennlinie konstant.

$$I_D(U_{DS,sat}) = \frac{k}{2}(U_{GS} - U_{th})^2 \Leftrightarrow k = \frac{2I_D(U_{DS,sat})}{(U_{GS} - U_{th})^2} = 4 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$$

k kann auch in jedem anderen Punkt des ohmschen oder Abschnürbereiches bestimmt werden.

Eine von mehreren weiteren Alternativen zu diesem Vorgehen wäre, k und U_{DS} durch Aufstellen eines Gleichungssystems zweier Drainströme im ohmschen Bereich gemeinsam zu bestimmen. Auch die Berechnung von k aus einem Drainstrom im Abschnürbereich ist direkt möglich; Einsetzen in einen Arbeitspunkt im ohmschen Bereich ergäbe somit U_{DS} .

e) (nur CPO)

$$U'_{DS} = U_{DS} - 600 \text{ mV} = 0,4 \text{ V}$$

$$U_{th} = -0,2 \text{ V}$$

$$U_{DS',sat} = U_{GS} - U_{th} \Leftrightarrow U_{GS}(U_{DS',sat}) = U_{DS'} + U_{th} = 0,4 \text{ V} - 0,2 \text{ V} = 0,2 \text{ V}$$

$$I_D(U_{DS',sat}) = \frac{k}{2}(U_{GS} - U_{th})^2 = 0,32 \text{ mA}$$

$$I_D(2,5 \text{ V}) = k \left((U_{GS} - U_{th})U_{DS'} - \frac{1}{2}U_{DS'}^2 \right) = 4 \text{ mA}$$

Kennlinie siehe Zeichnung 4.2

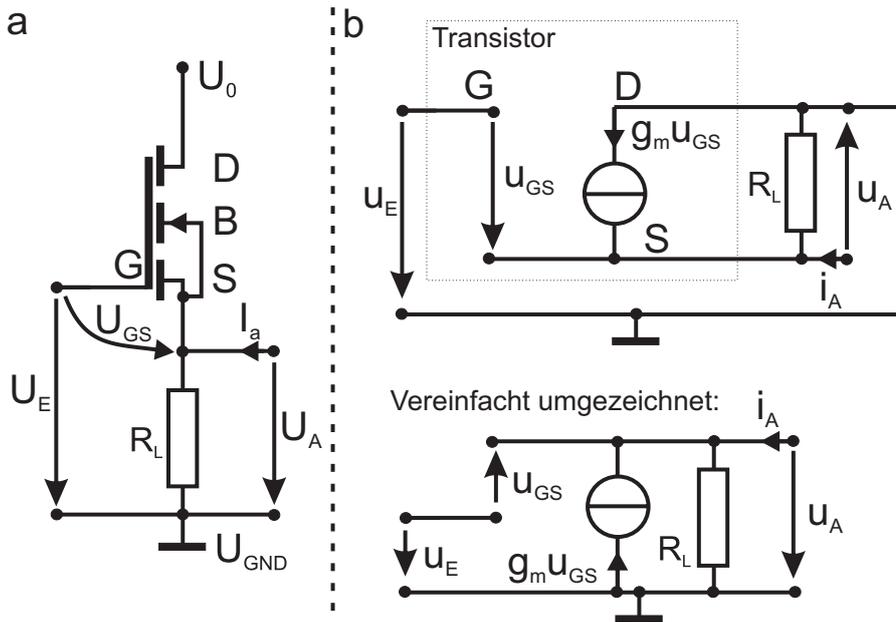


Abb. 4.3: a) Sourcefolger und b) Kleinsignal-Ersatzschaltbild

4.3 a) Ersatzschaltbild siehe Abb. 4.3.

b) Sourcefolger oder Drainschaltung.

c) Siehe Abb. 4.3.

d) (nur CPO)

$$r_a = \left(\frac{\partial I_a}{\partial U_a} \right)^{-1} = \left(\frac{u_a}{i_a} \right)_{u_e=0} \quad (4.1)$$

e) (CPO) / d) (DPO)

Berechnung des Ausgangswiderstandes mit dem Kleinsignal-Ersatzschaltbild:

$$\begin{aligned}
 u_A &= i_A R_L + g_m u_{GS} R_L \\
 u_A &= i_A R_L + g_m (u_E - u_A) R_L \Big|_{u_E=0} \\
 u_A &= i_A R_L - g_m u_A R_L \\
 u_A (1 + g_m R_L) &= i_A R_L \\
 \frac{u_A}{i_A} &= \frac{R_L}{1 + g_m R_L} \\
 r_A &= \frac{R_L}{1 + g_m R_L} = R_L \parallel \frac{1}{g_m}
 \end{aligned}$$

Alternativ ist die Berechnung auch direkt über die Definition des Kleinsignalverhaltens aus der Ableitung der Großsignalgrößen im Arbeitspunkt möglich:

$$\begin{aligned}
 r_A &= \left(\frac{\partial i_A}{\partial u_A} \right)^{-1} \\
 r_A &= \left[\frac{\partial}{\partial u_A} \left(\frac{u_A}{R_L} - I_D \right) \right]^{-1} \\
 r_A &= \left[\frac{\partial}{\partial u_A} \left(\frac{u_A}{R_L} - \frac{k}{2} (u_{GS} - u_{th})^2 \right) \right]^{-1} \\
 r_A &= \left[\frac{\partial}{\partial u_A} \left(\frac{u_A}{R_L} - \frac{k}{2} (u_E - u_A - u_{th})^2 \right) \right]^{-1} \\
 r_A &= \left[\frac{1}{R_L} + k(u_E - u_A - u_{th}) \right]^{-1} \\
 r_A &= \left[\frac{1}{R_L} + g_m \right]^{-1} \\
 r_A &= R_L \parallel \frac{1}{g_m} \\
 r_A &= 40 \Omega
 \end{aligned}$$