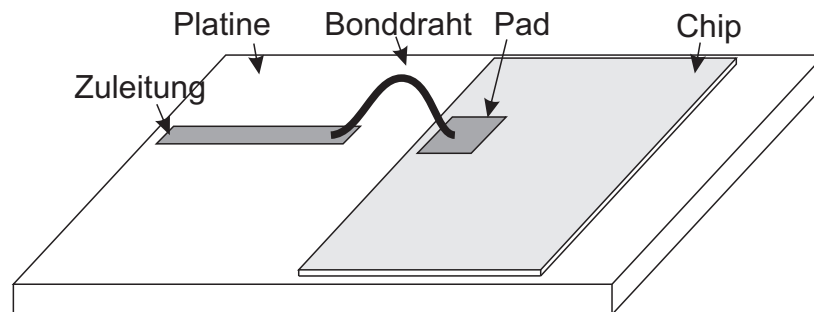


## Aufgabe 1: Passive Bauelemente (20 Punkte)

Gegeben ist eine Anordnung, bei dem ein Chip mittels eines dünnen Drahtes (Bonddraht) mit einer Leitung auf einer Platine verbunden ist. Der Bonddraht besteht aus Aluminium. Die Zuleitung auf der Platine sei vernachlässigbar.



**Abb. 1.1:** Skizze zur Veranschaulichung eines Bonddrahtes von einer Platine auf einen Chip

Durchmesser des Bonddrahtes	$d_{\text{Bond}} = 17 \mu\text{m}$
Länge des Bonddrahtes	$l_{\text{Bond}} = 1 \text{ mm}$
spezifischer Widerstand von Aluminium	$\rho_{\text{Al}} = 2,655 \mu\Omega\text{cm}$

1.1 Nun sollen die ohmschen Verluste des Bonddrahtes betrachtet werden.

- Berechnen Sie die ohmschen Verluste des Bonddrahtes! Nehmen Sie hierbei für den Bonddraht einen kreisförmigen Querschnitt mit dem Durchmesser  $d_{\text{Bond}}$  an!
- Um eine Überhitzung des Bonddrahtes zu verhindern, soll in diesem maximal 5 mW Verlustleistung in Wärme umgesetzt werden. Berechnen Sie den maximal zulässigen Strom durch den Bonddraht!

- 1.2 Auf dem Chip endet der Bonddraht auf einem Pad. Unter dem Pad befindet sich Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ) und darunter eine Massefläche. Nun sollen die reaktiven Einflüsse des Übergangs bei höheren Frequenzen betrachtet werden.

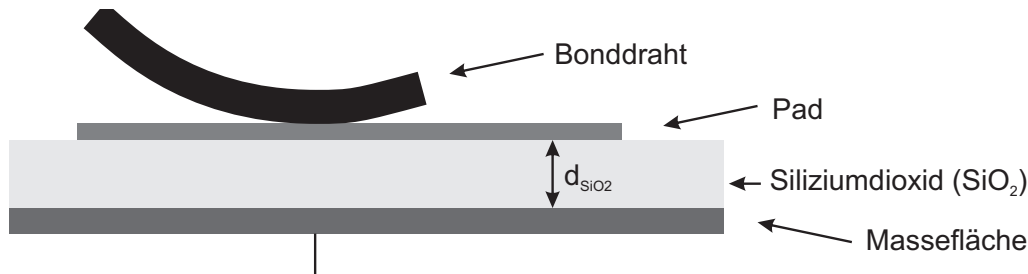


Abb. 1.2: Querschnitt durch den Chip

Breite des Pads	$b_{\text{Pad}} = 100 \mu\text{m}$
Länge des Pads	$l_{\text{Pad}} = 100 \mu\text{m}$
Dicke des Siliziumdioxides unter dem Pad	$d_{\text{SiO}_2} = 6 \mu\text{m}$
relative Dielektrizitätszahl $\text{SiO}_2$	$\epsilon_{r,\text{SiO}_2} = 3,9$
Dielektrizitätskonstante	$\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}$
Permeabilität im Vakuum	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}$

- a) Berechnen Sie die Padkapazität zwischen dem Pad und der darunterliegenden Massefläche! Streufelder können hierbei vernachlässigt werden.
- b) Berechnen Sie die Induktivität der Bonddrahtes! Diese lässt sich abschätzen mit:

$$L = \frac{\mu_0 \cdot l}{2\pi} \left( \ln \left( \frac{4l}{d} \right) - 0,75 \right)$$

- c) Vervollständigen Sie das Schaltbild zu einem Ersatzschaltbild des Bondübergangs mit 3 Elementen, welches sowohl die ohmschen und induktive Wirkung des Bonddrahtes, als auch die kapazitive Wirkung des Pads beschreibt. Benennen Sie die Elemente!



- d) Durch die reaktiven Einflüsse stellt der Übergang einen Tiefpass dar. Bestimmen Sie die Ordnung und Resonanzfrequenz  $f_{\text{res}}$  des Tiefpasses! Hierbei können die ohmschen Verluste vernachlässigt werden.

Zusatzblatt zur Aufgabe

## Aufgabe 2: PN-Diode (20 Punkte)

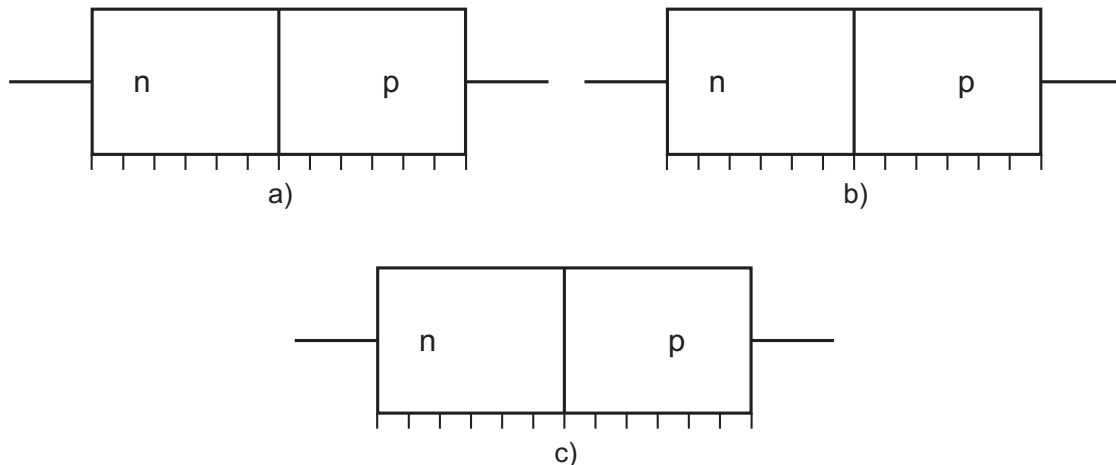


Abb. 2.1: pn-Dioden für Aufgabenpunkt 2.1

2.1 Zeichnen Sie qualitativ die Raumladungszonen im thermodynamischen Gleichgewicht in die dafür vorgesehene Abbildung 2.1 jeweils für eine Diode mit einem Dotierungsprofil von

- a)  $N_A = N_D$
- b)  $N_A = 4 \cdot N_D$
- c)  $N_D = 2 \cdot N_A$

ein.

Im Folgenden wird die Kapazitätsdiode aus Abbildung 2.2 untersucht. Die Spannung über der Diode beträgt 0 V. Gegeben sind die folgenden Parameter dieser Diode mit abrupten Übergang :

intrinsische Dichte	$n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
relative Dielektrizitätskonstante von Silizium	$\epsilon_r = 12$
Dielektrizitätskonstante im Vakuum	$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$
Temperaturspannung	$U_T = 26 \text{ mV bei } T = 300 \text{ K}$
Elementarladung	$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$
Weite des n-/p-Gebietes	$x_n = x_p = 500 \text{ nm}$
Diodenfläche	$A = 10000 \mu\text{m}^2$
Kontaktwiderstand	$R_K = 0,97 \Omega$

2.2 Berechnen Sie die Diffusionsspannung  $U_D$  der Diode.

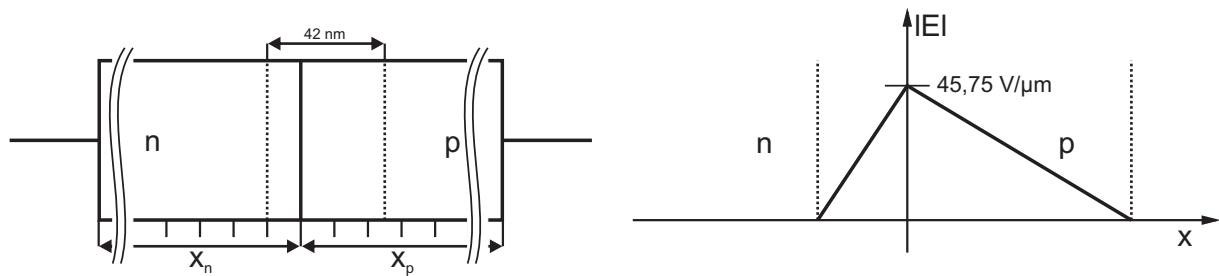


Abb. 2.2: pn-Diode und E-Feld über dem pn-Übergang

- 2.3 Berechnen Sie die Dotierstoffkonzentrationen  $N_A$  und  $N_D$  des p und n dotierten Gebietes der Diode. Geben Sie zusätzlich die Weiten  $w_n$  und  $w_p$  der Raumladungszonen innerhalb der Gebiete der Diode an. Geben Sie die Dotierstoffkonzentrationen in reziproken Kubikzentimetern  $\left[\frac{1}{\text{cm}^3}\right]$  an!
- 2.4 Der Bahnwiderstand  $R_s$  einer pn-Diode setzt sich aus einem Widerstand  $R_p$  für das p-Gebiet,  $R_n$  für das n-Gebiet und einem Kontaktwiderstand  $R_K$  zusammen. Bestimmen Sie mithilfe von Diagramm 2.3 die Widerstände  $R_p$ ,  $R_n$  und  $R_s$ .  
**Hinweis:** Wenn Sie den Aufgabenpunkt 2.3 nicht lösen konnten, rechnen Sie mit  $N_A = 3 \cdot 10^{18} \frac{1}{\text{cm}^3}$  weiter! Vernachlässigen Sie bei diesem Aufgabenpunkt die Sperrschicht!
- 2.5 Berechnen Sie die Güte für die Kapazitätsdiode bei einer Frequenz von 50 MHz. Für die Güte einer Kapazitätsdiode ist nur der Bahnwiderstand und die Sperrschichtkapazität zu betrachten.

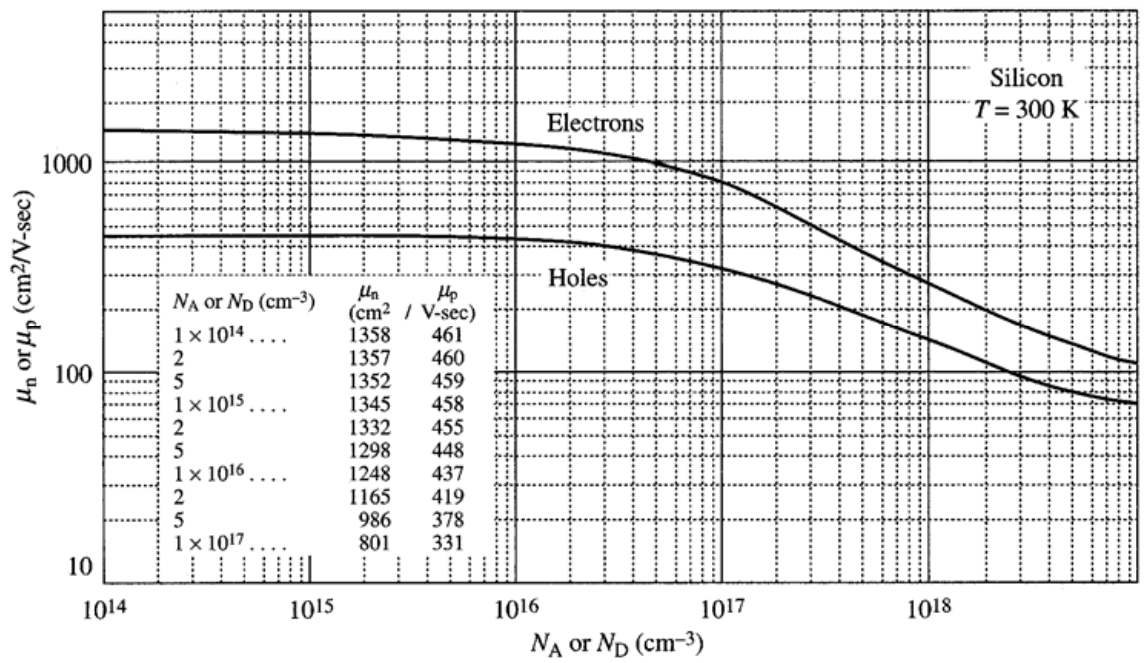


Abb. 2.3: Ladungsträgerbeweglichkeiten in Abhängigkeit der Dotierstoffkonzentration

Zusatzblatt zur Aufgabe

### Aufgabe 3: Bipolartransistor (20 Punkte)

Ein npn-Si-Bipolartransistor wird in einer Schaltung nach Abb. 3.1 betrieben.

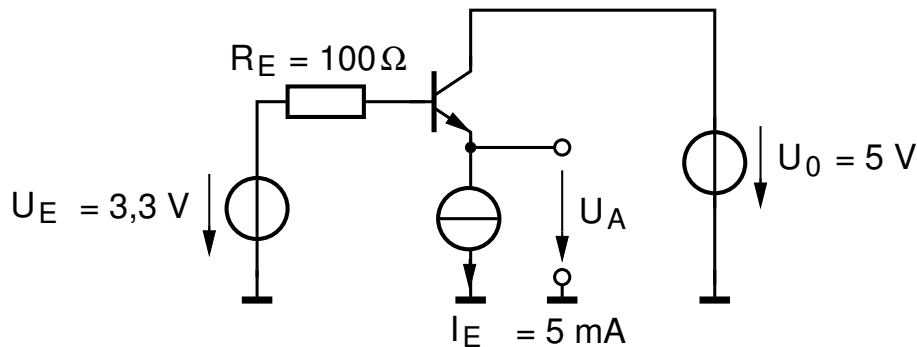


Abb. 3.1: Ein npn-Si-Bipolartransistor in einer Grundschtung.

Von dem Transistor sind folgende Daten bekannt:

Stromverstärkung	$B_N = 80$
Basisdotierung	$N_{AB} = 2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
effektive Basisweite (im Arbeitspunkt)	$w_B = 100 \text{ nm}$

Anmerkung: Die Emitterweite sei viel kürzer als die Löcherdiffusionslänge im Emitter

Emitterfläche	$A = 32 \text{ } \mu\text{m}^2$
Earlyspannung	$U_{AN} = 30 \text{ V}$

Außerdem ist:

Elementarladung	$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Diffusionskonstante	$D_{nB} = 35 \text{ cm}^2/\text{s}$
Intrinsische Dichte bei 300 K (Silizium)	$n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
Temperaturspannung bei $T = 300 \text{ K}$	$U_T = 26 \text{ mV}$

Der Basiswiderstand ist vernachlässigbar!

- 3.1 Wie heißt diese Grundschtung des Transistors? Was ist die typische Anwendung dieser Grundschtung?
- 3.2 Berechnen Sie den Transport-Sättigungsstrom des Transistors!
- 3.3 Berechnen Sie die Spannung  $U_A$ , die sich an der Stromquelle aufbaut! Berücksichtigen Sie den Basisstrom bei der Rechnung. Der Transistor befindet sich im normal-aktiven Bereich. Ist diese Annahme richtig?
- 3.4 Zeichnen Sie das Kleinsignalersatzschaltbild (ESB) der Schaltung und berechnen Sie dessen Elemente! Vernachlässigen Sie die Kapazitäten und den Rückwirkungsleitwert!



Vernachlässigen Sie nun  $g_{bC}$  und  $g_{CE}$ !

3.5 Berechnen Sie den Ausgangswiderstand der Schaltung! Nehmen Sie dafür an, dass die Eingangsquelle abgeschaltet ist.

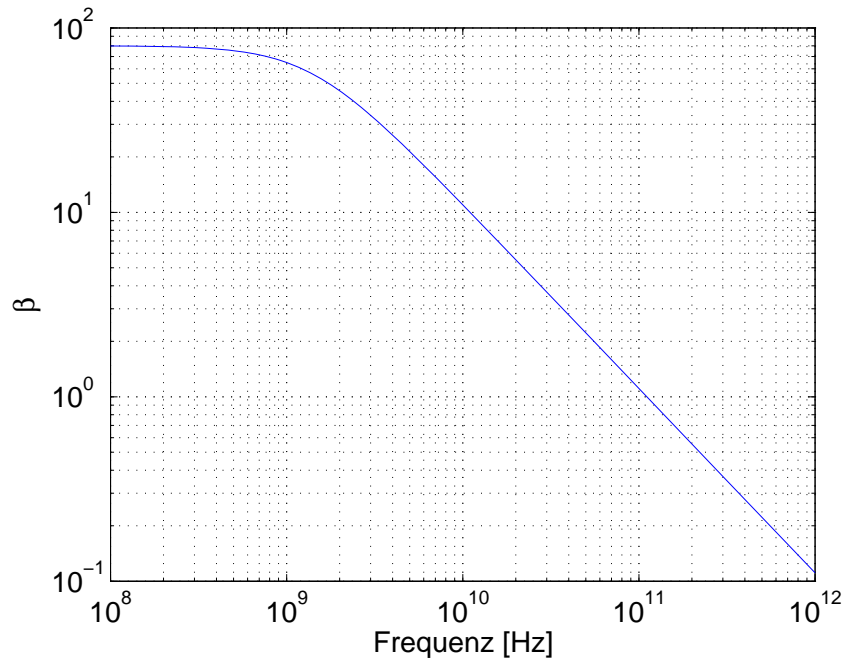


Abb. 3.2: Stromverstärkung in Abhängigkeit von der Frequenz

3.6 Bestimmen Sie aus Abbildung 3.2 die Transitfrequenz des Transistors!

Zusatzblatt zur Aufgabe

### Aufgabe 4: MOSFET (20 Punkte)

4.1 In diesem Aufgabenpunkt ist ein selbstsperrender p-MOS Transistor gegeben.

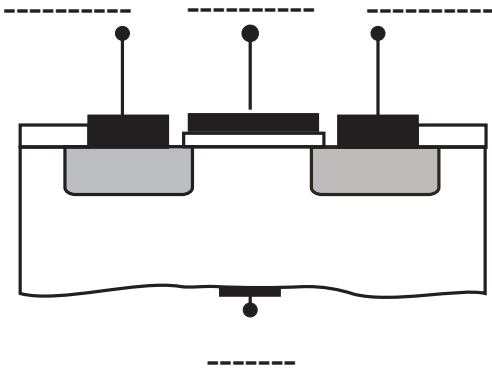


Abb. 4.1: Transistorquerschnitt

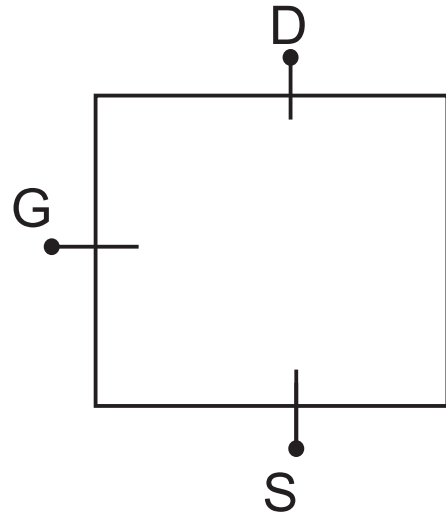


Abb. 4.2: Schaltsymbol

- Abb. 4.1 zeigt den Querschnitt des Transistors. Kennzeichnen Sie die dotierten Regionen (n+,n,p+,p) und bezeichnen Sie die Anschlüsse!
- Zeichnen Sie das zugehörige Schaltsymbol in Abb. 4.2 ein! Hierbei soll  $U_{BS} = 0$  gelten.
- Einige physikalischen Parameter des MOSFET sind temperaturabhängig aber ihr Einfluss auf den Drainstrom kann kompensiert werden. Welche Parameter eines MOSFET sind temperaturabhängig? Wie wirkt sich steigende Temperatur auf diese Parameter aus?
- Gegeben sind 2 MOSFETs mit gleichen Abmessungen und den gleichen anliegenden Spannungen  $U_{DS}$  und  $U_{GS}$ . Geben Sie das Verhältnis der Drainströme der beiden Transistoren an, wenn das Gate von Transistor 1 eine doppelt so hohe Flächenkapazität aufweist wie das Gate von Transistor 2! Begründen Sie Ihre Antwort anhand einer Gleichung!

4.2 Folgende Parameter eines n-MOS Transistors sind gegeben :  $U_{GS} = 1 \text{ V}$ ,  $U_{th,n} = 0,2 \text{ V}$ ,  $\lambda = 0,2 \text{ V}^{-1}$ ,  $k = 20 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$

- a) Berechnen Sie die Parameter und Arbeitspunkte in Tabelle 4.3!
- b) Im Folgenden soll die Kennlinie des Transistors in Abb. 4.4 eingezeichnet werden. Tragen Sie zunächst die berechneten Arbeitspunkte in das Diagramm ein! Anschließend tragen Sie die Kennlinie ein! Hierbei genügt eine qualitative Zeichnung.

Variable	Zahlenwert
$U_{DS,sat}$	
$I_D(U_{DS,sat})$	
$I_D(U_{DS} = 0,4\text{V})$	
$I_D(U_{DS} = 1,6\text{V})$	

Abb. 4.3: Arbeitspunkte

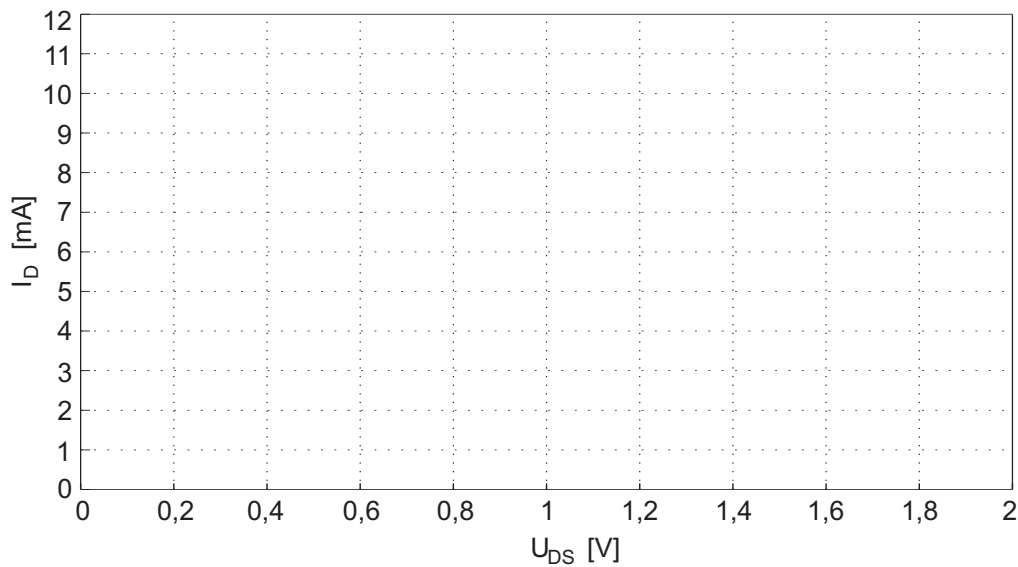


Abb. 4.4: Ausgangskennlinie

- 4.3 In diesem Aufgabenpunkt soll eine einstellbare Spannungsquelle mit Hilfe eines MOS-FETs genutzt werden. Dazu ist die Schaltung in Abb. 4.5 gegeben. Der Transistor befindet sich im Abschnürbereich. Die Kanallängenmodulation kann vernachlässigt werden. Folgende Parameter sind gegeben:  $R_D = 100 \Omega$ ,  $U_{DD} = 4 \text{ V}$ .

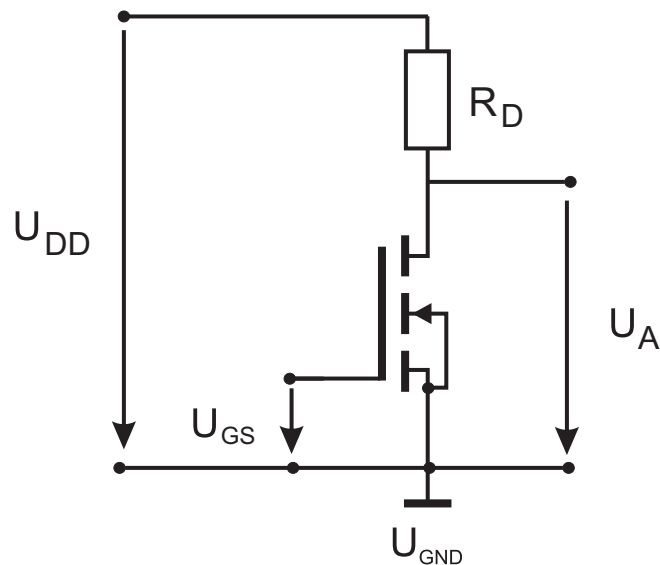


Abb. 4.5: MOS Transistor

- a) Um welche Grundschaltung handelt es sich in Abb. 4.5?
- b) Zeichnen Sie ein einfaches Großsignalersatzschaltbild der Schaltung in Abb. 4.5, welches für Gleichstromanwendungen geeignet ist!
- c) Bestimmen Sie den Strom der durch den Widerstand  $R_D$  fließt in Abhängigkeit von  $U_A$ !
- d) Dimensionieren Sie  $U_{GS}$  so, dass der Wert der Ausgangsspannung  $U_A = 0.75 \cdot U_{DD}$  beträgt! Es gilt  $k_n = 10 \frac{\text{mA}}{\text{V}^2}$ ,  $U_{th} = 0,5 \text{ V}$

Zusatzblatt zur Aufgabe

## Aufgabe 1: Passive Bauelemente (20 Punkte)

1.1 Nun sollen die ohmschen Verluste des Bonddrahtes betrachtet werden.

- a) Berechnen Sie die ohmschen Verluste des Bonddrahtes! Nehmen Sie hierbei für den Bonddraht einen kreisförmigen Querschnitt mit dem Durchmesser  $d_{\text{Bond}}$  an!

$$\begin{aligned}
 R_{\text{Bond}} &= \rho \frac{l}{A} \\
 &= \rho_{\text{Al}} \frac{l_{\text{Bond}}}{\frac{\pi}{4} \cdot d_{\text{Bond}}^2} \\
 &= 117 \text{ m}\Omega
 \end{aligned}$$

- b) Um eine Überhitzung des Bonddrahtes zu verhindern, soll in diesem maximal 5 mW Verlustleistung in Wärme umgesetzt werden. Berechnen Sie den maximal zulässigen Strom durch den Bonddraht!

$$\begin{aligned}
 P &= U \cdot I \\
 &= R \cdot I^2 \\
 \rightarrow I_{\text{max}} &= \sqrt{\frac{P_{\text{Bond}}}{R}} = 206,7 \text{ mA}
 \end{aligned}$$

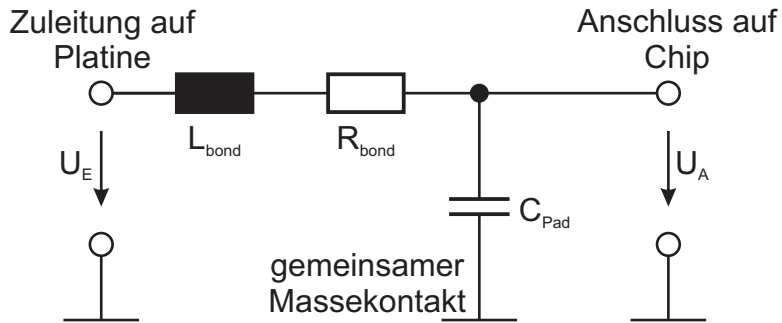
- c) Berechnen Sie die Padkapazität zwischen dem Pad und der darunterliegenden Massefläche! Streufelder können hierbei vernachlässigt werden.

$$\begin{aligned}
 C_{\text{Pad}} &= \epsilon \frac{A}{d} \\
 &= \epsilon_0 \epsilon_{r, \text{SiO}_2} \frac{b_{\text{Pad}} \cdot l_{\text{Pad}}}{d_{\text{SiO}_2}} \\
 &= 57,55 \text{ fF}\Omega
 \end{aligned}$$

- d) Berechnen Sie die Induktivität der Bonddrahtes! Diese lässt sich abschätzen mit:

$$\begin{aligned}
 L &= \frac{\mu_0 \cdot l}{2\pi} \left( \ln \left( \frac{4l}{d} \right) - 0,75 \right) \\
 &= \frac{\mu_0 \cdot l_{\text{Bond}}}{2\pi} \left( \ln \left( \frac{4l_{\text{Bond}}}{d_{\text{Bond}}} \right) - 0,75 \right) \\
 &= 942,2 \text{ pH}
 \end{aligned}$$

- e) Vervollständigen Sie das Schaltbild zu einem Ersatzschaltbild des Bondübergangs mit 3 Elementen, welches sowohl die ohmschen und induktive Wirkung des Bonddrahtes, als auch die kapazitive Wirkung des Pads beschreibt. Benennen Sie die Elemente!



- f) Durch die reaktiven Einflüsse stellt der Übergang einen Tiefpass dar. Bestimmen Sie die Ordnung und Resonanzfrequenz  $f_{\text{res}}$  des Tiefpasses! Hierbei können die ohmschen Verluste vernachlässigt werden.

$$f_{\text{res}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{\text{Bond}}C_{\text{Pad}}}}$$

$$= 21.61 \text{ GHz}$$

Da der Tiefpass zwei reaktive Bauelemente enthält, handelt es sich um einen Tiefpass zweiter Ordnung



Aufgabe 2: PN-Diode (20 Punkte)

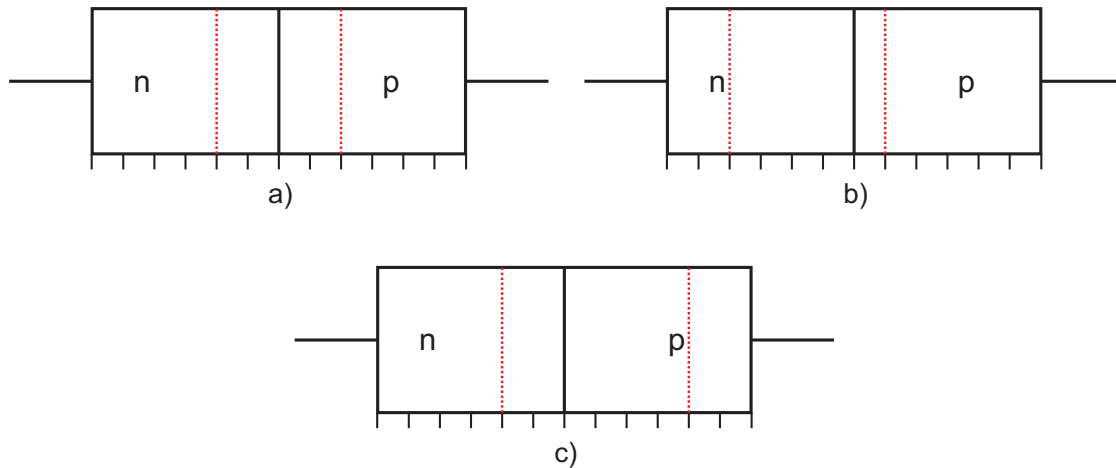


Abb. 2.1: pn-Dioden für Aufgabenpunkt 2.1

2.1 Zeichnen Sie qualitativ die Raumladungszonen im thermodynamischen Gleichgewicht in die dafür vorgesehene Abbildung 2.1 jeweils für eine Diode mit einem Dotierungsprofil von

- a)  $N_A = N_D \Rightarrow \frac{N_A}{N_D} = 1 \Rightarrow w_n = w_p$
- b)  $N_A = 4 \cdot N_D \Rightarrow \frac{N_A}{N_D} = 4 \Rightarrow \frac{w_n}{w_p} = 4$
- c)  $N_D = 2 \cdot N_A \Rightarrow \frac{N_D}{N_A} = 2 \Rightarrow \frac{w_p}{w_n} = 2$

ein.

Im Folgenden wird die Kapazitätsdiode aus Abbildung 2.2 untersucht. Die Spannung über der Diode beträgt 0 V. Gegeben sind die folgenden Parameter dieser Diode mit abrupten Übergang :

intrinsische Dichte	$n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
relative Dielektrizitätskonstante von Silizium	$\epsilon_r = 12$
Dielektrizitätskonstante im Vakuum	$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$
Temperaturspannung	$U_T = 26 \text{ mV bei } T = 300 \text{ K}$
Elementarladung	$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$
Weite des n-/p-Gebietes	$x_n = x_p = 500 \text{ nm}$
Diodenfläche	$A = 10000 \mu\text{m}^2$
Kontaktwiderstand	$R_K = 0,97 \Omega$

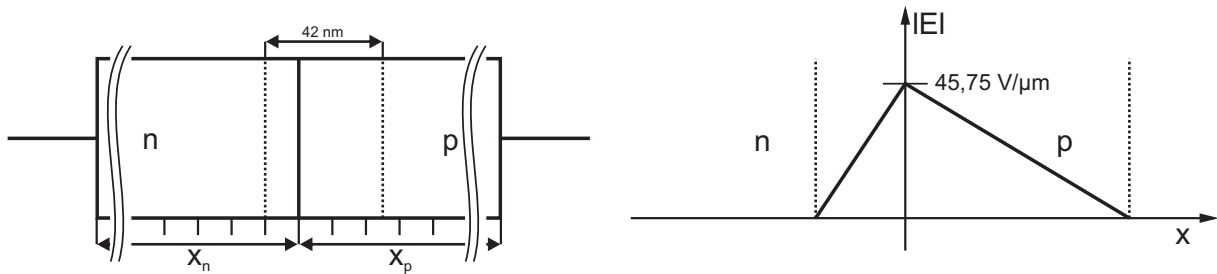


Abb. 2.2: pn-Diode und E-Feld über dem pn-Übergang

2.2 Berechnen Sie die Diffusionsspannung  $U_D$  der Diode.

Aus Abbildung 2.2 ergibt sich für  $E_{\max} = 45,75 \frac{\text{V}}{\mu\text{m}}$  und  $w_s = w_n + w_p = 42 \text{ nm}$ .

$$\begin{aligned} U_D &= \frac{1}{2} \cdot E_{\max} \cdot (w_p + w_n) \\ &= \frac{1}{2} \cdot 45,75 \frac{\text{V}}{\mu\text{m}} \cdot 42 \text{ nm} \\ &= 0,96075 \text{ V} \approx 0,961 \text{ V} \end{aligned}$$

2.3 Berechnen Sie die Dotierstoffkonzentrationen  $N_A$  und  $N_D$  des p und n dotierten Gebietes der Diode. Geben Sie zusätzlich die Weiten  $w_n$  und  $w_p$  der Raumladungszonen innerhalb der Gebiete der Diode an. Geben Sie die Dotierstoffkonzentrationen in reziproken Kubikzentimetern  $\left[\frac{1}{\text{cm}^3}\right]$  an!

Aus Abbildung 2.2 folgt für  $\frac{w_p}{w_n} = \frac{N_D}{N_A} = 2,5$

$$w_n + w_p = 42 \text{ nm} \quad \text{mit} \quad w_p = 2,5 \cdot w_n$$

$$3,5 \cdot w_n = 42 \text{ nm}$$

$$\Rightarrow w_n = 12 \text{ nm} \quad \text{und} \quad w_p = 30 \text{ nm}$$

$$E_{\max} = \frac{e \cdot N_A}{\epsilon} \cdot w_p = \frac{e \cdot N_D}{\epsilon} \cdot w_n$$

$$N_A = \frac{E_{\max} \cdot \epsilon}{e \cdot w_p} = \frac{45,75 \frac{\text{V}}{\mu\text{m}} \cdot 12 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}}{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 30 \text{ nm}}$$

$$N_A = 1,0114 \cdot 10^{24} \frac{1}{\text{m}^3} \approx 1 \cdot 10^{18} \frac{1}{\text{cm}^3}$$

$$\Rightarrow N_D = 2,5 \cdot N_A = 2,5 \cdot 10^{18} \frac{1}{\text{cm}^3}$$

2.4 Der Bahnwiderstand  $R_s$  einer pn-Diode setzt sich aus einem Widerstand  $R_p$  für das p-Gebiet,  $R_n$  für das n-Gebiet und einem Kontaktwiderstand  $R_K$  zusammen. Bestimmen Sie mithilfe von Diagramm 2.3 die Widerstände  $R_p$ ,  $R_n$  und  $R_s$ .

**Hinweis:** Wenn Sie den Aufgabenpunkt 2.3 nicht lösen konnten, rechnen Sie mit  $N_A = 3 \cdot 10^{18} \frac{1}{\text{cm}^3}$  weiter! Vernachlässigen Sie bei diesem Aufgabenpunkt die Sperrschicht!

Aus Abbildung 2.3 ergibt sich für  $\mu_n = 175 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$  und  $\mu_p = 140 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$ .

$$\begin{aligned}\sigma_n &= e \cdot N_D \cdot \mu_n \\ \sigma_n &= 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 2,5 \cdot 10^{18} \frac{1}{\text{cm}^3} \cdot 175 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \\ \sigma_n &= 7008,75 \frac{1}{\Omega\text{m}} \\ R_n &= \frac{l}{\sigma_n \cdot A} \\ R_n &= \frac{500 \text{ nm}}{7008,75 \frac{1}{\Omega\text{m}} \cdot 10000 \mu\text{m}^2} \\ R_n &= 7,134 \text{ m}\Omega\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_p &= e \cdot N_A \cdot \mu_p \\ \sigma_p &= 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 1 \cdot 10^{18} \frac{1}{\text{cm}^3} \cdot 140 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \\ \sigma_p &= 2242,8 \frac{1}{\Omega\text{m}} \\ R_p &= \frac{l}{\sigma_p \cdot A} \\ R_p &= \frac{500 \text{ nm}}{2242,8 \frac{1}{\Omega\text{m}} \cdot 10000 \mu\text{m}^2} \\ R_p &= 22,294 \text{ m}\Omega\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Rightarrow R_s &= R_n + R_p + R_K \\ &= 7,134 \text{ m}\Omega + 22,294 \text{ m}\Omega + 0,97 \Omega \\ &= 0,999428 \Omega \approx 1 \Omega\end{aligned}$$

2.5 Berechnen Sie die Güte für die Kapazitätsdiode bei einer Frequenz von 50 MHz.

$$\begin{aligned}Q &= \frac{1}{\omega \cdot R_s \cdot C_{Sp}} \\ U_{St} &= 0 \Rightarrow C_{Sp} = C_{Sp0}\end{aligned}$$

$$C_{Sp0} = \frac{\epsilon \cdot A}{w_s} = \frac{12 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm} \cdot 10000 \mu m^2}{42 \text{ nm}}$$

$$C_{Sp0} = 25,297 \text{ pF} \approx 25,3 \text{ pF}$$

$$\Rightarrow Q = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ MHz} \cdot 1 \Omega \cdot 25,3 \text{ pF}}$$

$$= 125,814 \approx 126$$

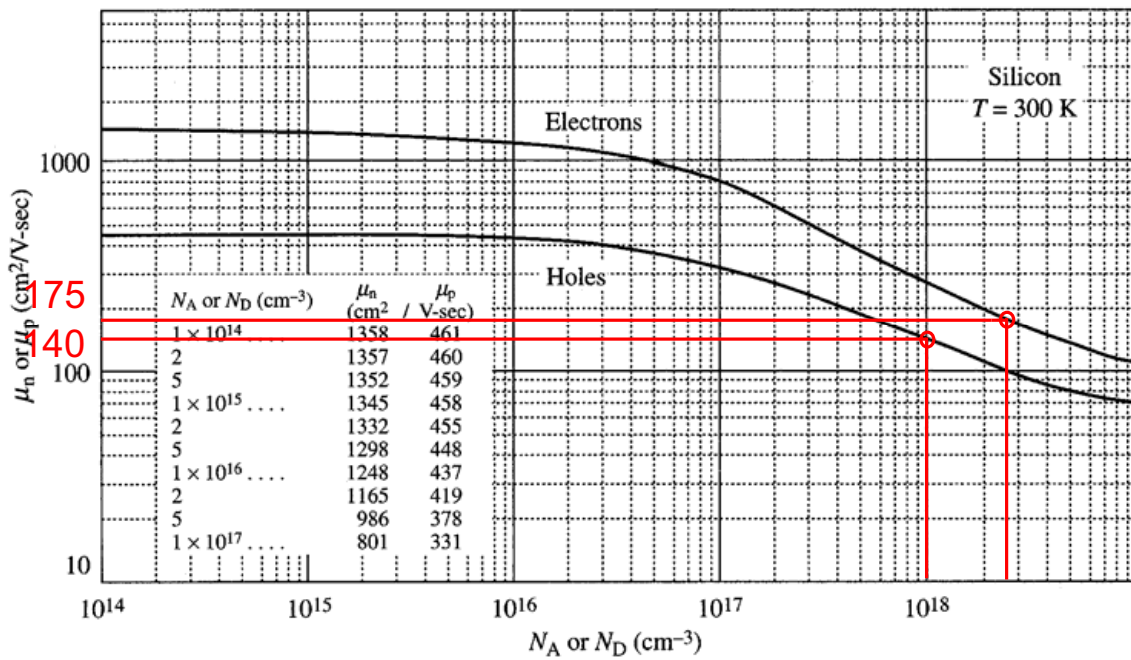


Abb. 2.3: Ladungsträgerbeweglichkeiten in Abhängigkeit der Dotierstoffkonzentration

### Aufgabe 3: Bipolartransistor (20 Punkte)

3.1 Kollektorschaltung, Emitterfolger. Sie wird meist als Treiberschaltung eingesetzt.

3.2 Bestimmung des Transport-Sättigungsstroms  $I_S$ :

$$\begin{aligned}
 I_S &= \frac{e \cdot A \cdot D_{nB} \cdot n_{B0}}{w_B} = \frac{e \cdot A \cdot D_{nB} \cdot n_i^2}{w_B \cdot N_{AB}} \\
 &= \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 32 \mu\text{m}^2 \cdot 35 \text{ cm}^2/\text{s} \cdot (1,5 \cdot 10^{10})^2 \text{ cm}^{-6}}{100 \text{ nm} \cdot 2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}} \\
 &= 20 \text{ aA}
 \end{aligned}$$

3.3

$$\begin{aligned}
 I_C &= \frac{I_E \cdot \beta_N}{\beta_N + 1} = 4,94 \text{ mA} \\
 I_C &= I_S \cdot \left[ \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right) - 1 \right] \approx I_S \cdot \exp\left(\frac{U_{BE}}{U_T}\right) \\
 \Rightarrow U_{BE} &= U_T \cdot \ln\left(\frac{I_C}{I_S}\right) = 0,86 \text{ V} \\
 \Rightarrow U_A &= U_E - I_B \cdot R_E - U_{BE} = 2,44 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Der Transistor befindet sich im normal-aktiven Bereich, da  $U_{BC} \approx -1,7 \text{ V} < 0 \text{ V}$ !

3.4

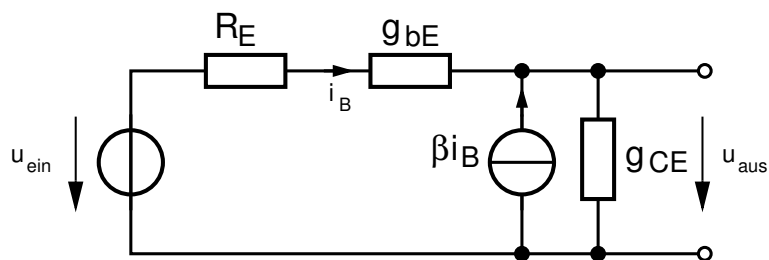


Abb. 3.1: Kleinsignalersatzschaltbild der Schaltung.

$$\begin{aligned}
 \text{Steilheit } g_m &= \frac{I_C}{U_T} = \frac{4,942 \text{ mA}}{26 \text{ mV}} = 190 \text{ mS} \\
 \text{Kleinsignalleitwert } g_{BE} &= \frac{g_m}{\beta_N} = \frac{190 \text{ mS}}{80} = 2,38 \text{ mS} \\
 U_{CE} &= U_0 - U_A = 5 \text{ V} - 2,44 \text{ V} = 2,56 \text{ V} \\
 \text{Ausgangsleitwert } g_{CE} &= \frac{I_C}{U_{CE} + U_{AN}} = \frac{4,94 \text{ mA}}{2,56 \text{ V} + 30 \text{ V}} = 0,15 \text{ mS}
 \end{aligned}$$

3.5 Es sei  $\beta \approx \beta_N$

$$\begin{aligned}r_{\text{aus}} &= \frac{\partial U_{\text{aus}}}{\partial I_{\text{aus}}} = \frac{u_{\text{aus}}}{i_{\text{aus}}} \\u_{\text{aus}} &= -i_B \cdot (r_{\text{BE}} + R_E) \\i_{\text{aus}} &= (\beta + 1) \cdot i_B \\r_{\text{aus}} &= \frac{r_{\text{BE}} + R_E}{1 + \beta} = 6,4 \, \Omega\end{aligned}$$

3.6 Die Definition der Transistfrequenz lautet:  $\beta(f_T) = 1$ . Somit ist  $f_T = 110 \text{ GHz}$ .

Aufgabe 4: MOSFET (20 Punkte)

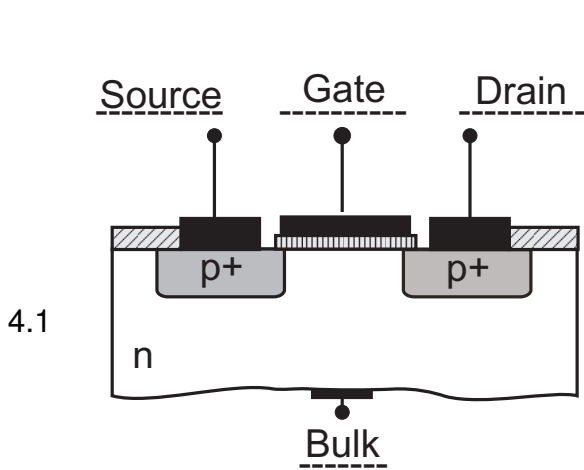


Abb. 4.1: Transistorquerschnitt

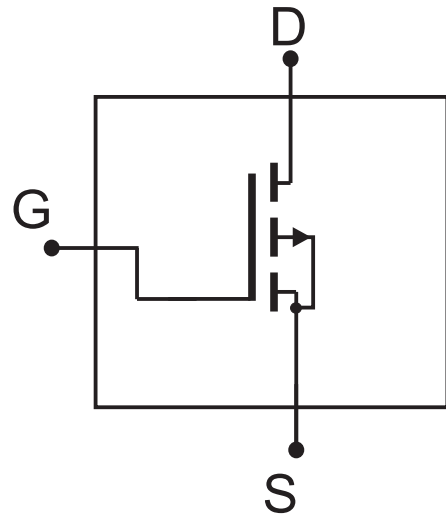


Abb. 4.2: Schaltsymbol

- a)
- b)
- c)  $\mu$  fällt,  $U_{th}$  fällt
- d) Die Gatekapazität  $C_{ox}$  von Transistor 1 ist doppelt so hoch wie die Gatekapazität von Transistor 2.  
 $\Rightarrow \frac{k_1}{k_2} = 2$   
 $\Rightarrow \frac{I_{D,1}}{I_{D,2}} = 2$

4.2 a)

Variable	Zahlenwert
$U_{DS,sat}$	0,8 V
$I_D(U_{DS,sat})$	7,42 mA
$I_D(0,4V)$	5,18 mA
$I_D(1,6V)$	8,45 mA

Abb. 4.3: Arbeitspunkte

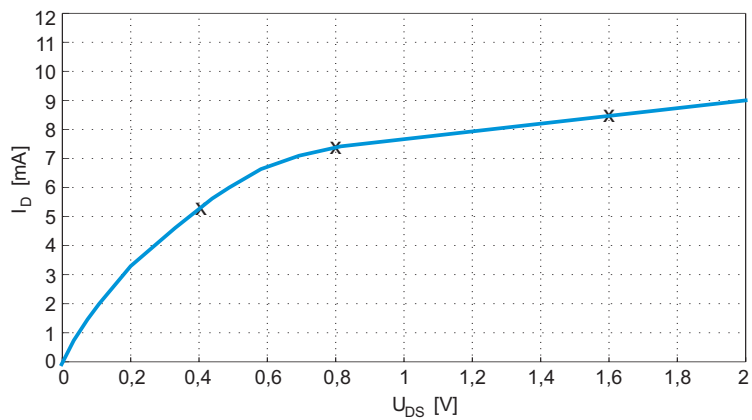
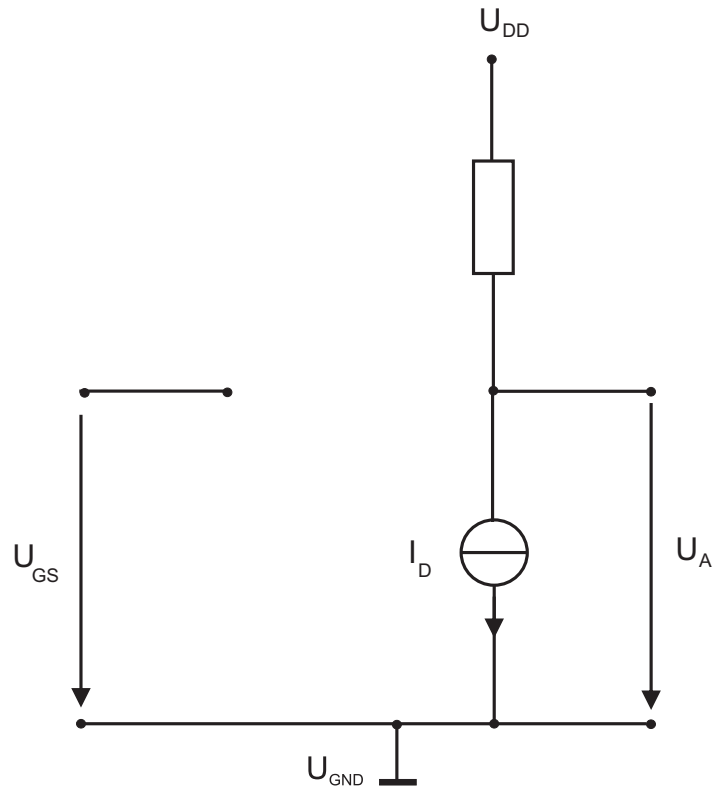


Abb. 4.4: Ausgangskennlinie

4.3 a) Sourceschaltung



b)

Abb. 4.5: Großsignalersatzschaltbild

c)

$$I_{Rd} = \frac{U_{DD} - U_A}{R_D} = \frac{4V - U_A}{10000\Omega}$$

d)

$$\begin{aligned} I_D(U_{GS}) &= I_{Rd}(U_A) \\ \Rightarrow \frac{k}{2}(U_{GS} - U_{th})^2 &= \frac{U_{DD} - 0,75 U_{DD}}{R_D} \\ \Rightarrow U_{GS} &= \sqrt{\frac{0,5 U_{DD}}{k R_D}} + U_{th} \\ &= \sqrt{\frac{0,5 \cdot 4V}{10 \cdot 10^{-3} A/V^2 \cdot 100\Omega}} + 0,5V \\ &= 1,91V \end{aligned}$$