

Aufgabe 1: Resistiver Touchscreen (20 Punkte)

Gegeben sind zwei Widerstandsfilme aus Indiumzinnoxid, die auf einen Glasträger aufgedampft wurden. Diese sollen zur Realisierung eines berührungsempfindlichen Bildschirms (Touchscreen) eingesetzt werden. Die beiden Widerstandsfilme werden mit geringem Abstand so platziert, dass durch eine Berührung ein leitender Kontakt zwischen den Schichten entsteht.

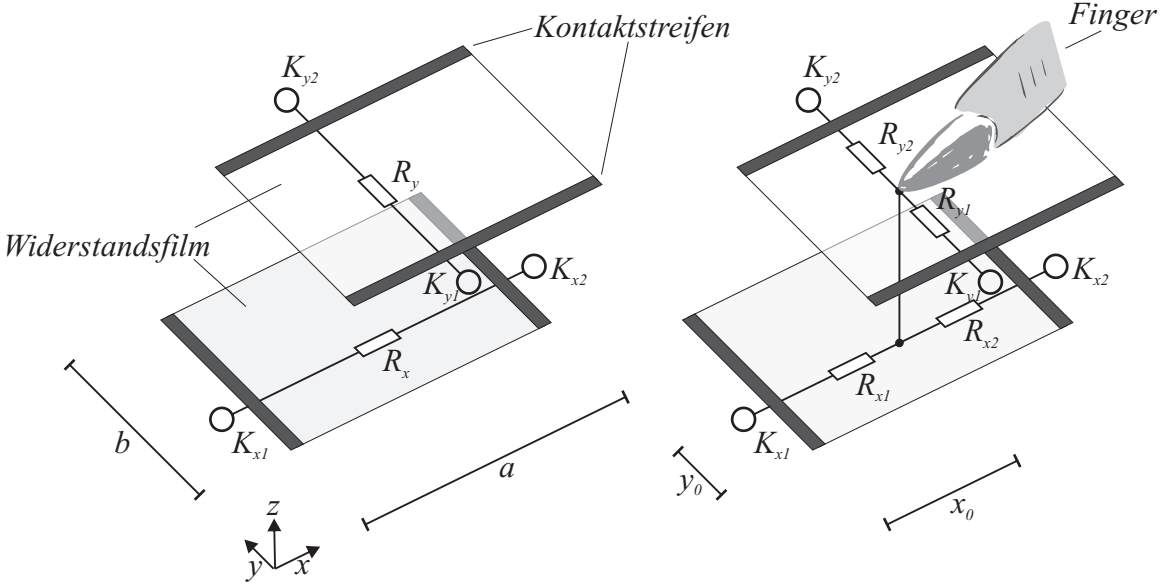


Abb. 1.1: Resistiver Touchscreen ohne und mit Berührung

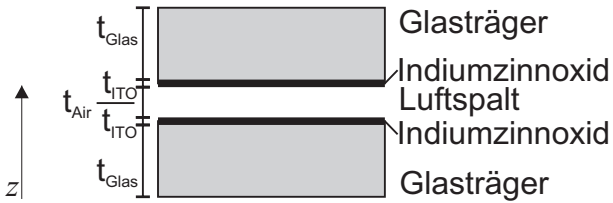


Abb. 1.2: Aufbau der Schichten des Touchscreens

Folgende Daten sind gegeben:

- | | |
|----------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Abmessung in x-Richtung | $a = 400 \text{ mm}$ |
| Abmessung in y-Richtung | $b = 300 \text{ mm}$ |
| Dicke Indiumzinnoxid | $t_{ITO} = 200 \text{ nm}$ |
| Dicke Luftschicht | $t_{Air} = 10 \text{ }\mu\text{m}$ |
| Dicke Glasträger | $t_{Glas} = 100 \text{ }\mu\text{m}$ |
| Spezifischer Widerstand Indiumzinnoxid | $\rho_{ITO} = 1,9 \cdot 10^{-6} \text{ }\Omega\text{m}$ |
| Dielektrizitätskonstante | $\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}$ |
| Permeabilität im Vakuum | $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}$ |

- 1.1 a) Wie ist allgemein der Flächenwiderstand R_F einer Widerstandsschicht definiert und welche Einheit hat dieser? Welcher Wert für den Flächenwiderstand ergibt sich für die Indiumzinnoxid-Schicht auf dem Glasträger?
- b) Berechnen Sie die Gesamtwiderstände R_x und R_y der beiden Schichten, für den Fall, dass der Bildschirm nicht berührt wird!
- 1.2 Nun werde der Touchscreen an der Position x_0, y_0 berührt. Gehen Sie zur Vereinfachung davon aus, dass die Widerstandsschicht bis zum Berührungspunkt auf der vollen Breite wirkt.
- a) Welche Werte ergeben sich für die vier Teilwiderstände R_{x1} , R_{x2} , R_{y1} und R_{y2} in Abhängigkeit von dem Berührungspunkt x_0, y_0 ?
- b) Zum Messen der Position in x-Richtung wird der Anschluss K_{x1} auf Masse und der Anschluss K_{x2} auf 1 V gelegt. An den Anschlüssen K_{y1} bzw. K_{y2} wird hochohmig die resultierende Spannung gemessen. Welche Spannung stellt sich dort in Abhängigkeit von der Messposition x_0 ein?
- Zur Messung der Position in y-Richtung wird analog zu 1.2 b) verfahren, so dass für jede Positionsmessung zwei Messzyklen nötig sind.
- 1.3 Im Folgenden soll eine "worst-case"-Abschätzung für das dynamische Verhalten vorgenommen werden. Hierzu wird der unberührte Touchscreen untersucht.
- a) Berechnen Sie die Kapazität zwischen den beiden Widerstandsschichten als Plattenkondensator!
- b) Welche Zeitkonstanten τ_x und τ_y ergeben sich für die Messungen in x- bzw. y-Richtung? Gehen Sie in der vereinfachten Betrachtung davon aus, dass die Zeitkonstanten durch die gesamte in a) berechnete Kapazität C und die jeweiligen Gesamtwiderstände R_x und R_y bestimmt werden.
- c) Am Touchscreen soll 50 mal pro Sekunde eine Positionsmessung vorgenommen werden. Beeinflusst die parasitäre Kapazität zwischen den Widerstandsschichten mit den unter b) berechneten Zeitkonstanten die Messung merklich? Begründen Sie Ihre Antwort!
- 1.4 Der Touchscreen soll in einem mobilen Computer eingesetzt werden. Hierzu soll im Folgenden die Verlustleistung abgeschätzt werden. Betrachten Sie weiterhin den unberührten Touchscreen. Parasitäre Kapazitäten sollen jetzt vernachlässigt werden.
- a) Welche momentane Verlustleistung wird statisch in den Widerständen R_x bzw. R_y umgesetzt, wenn über diesen jeweils die Messspannung von 1 V anliegt?
- b) Zur Verringerung der Leistungsaufnahme wird die Messzeit verringert. Welche mittlere Verlustleistung ergibt sich, wenn der Touchscreen 50 mal pro Sekunde ausgelesen wird und Sie davon ausgehen, dass die Messungen in x- bzw. y-Richtung $10\tau_x$ bzw. $10\tau_y$ dauern.

Aufgabe 2: PN-Diode (20 Punkte)

Gegeben ist die Schaltung in Abbildung 2.1 sowie die folgenden Parameter:

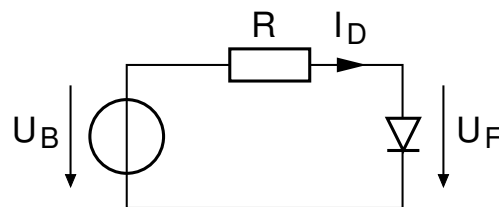


Abb. 2.1: Dioden-Schaltung

Dotierstoffkonzentrationen:	$N_A = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
	$N_D = 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
intrinsische Dichte	$n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
relative Dielektrizitätskonstante von Silizium	$\epsilon_r = 11,9$
Dielektrizitätskonstante im Vakuum	$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$
Temperaturspannung	$U_T = 26 \text{ mV bei } T = 300 \text{ K}$
Transitzeit	$\tau_T = 10 \text{ ns}$
Elementarladung	$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$
Widerstand	$R = 200 \Omega$

Die Diode befindet sich zunächst im Flussbetrieb mit einem Strom von $I_D = 4 \text{ mA}$.

- 2.1 Bestimmen Sie die Spannung U_B mit Hilfe einer Arbeitsgeraden in Abbildung 2.2!
- 2.2 Welchen Sperrsättigungsstrom I_S besitzt die Diode?
- 2.3 Berechnen Sie die Weite der Raumladungszone w_{RLZ} !
- 2.4 Wie groß ist die Ladung im Diffusionsgebiet Q_S ?

Die Quelle wird zum Zeitpunkt $t = 0$ auf $U_B = -3,25 \text{ V}$ umgeschaltet.

- 2.5 Wie groß ist der Strom I_D direkt nach dem Umschalten?
- 2.6 Wie ändern sich qualitativ die Weite der Raumladungszone und die Sperrschichtkapazität durch das Umschalten von U_B ? (keine Zahlenwerte)
Hinweis: Betrachten Sie den eingeschwungenen Zustand.
- 2.7 Nach welcher Zeit ist Q_S aus Aufgabe 2.4 abgebaut? Wie heißt die Zeit?
- 2.8 Skizzieren Sie in Abbildung 2.3 den Verlauf von I_D !

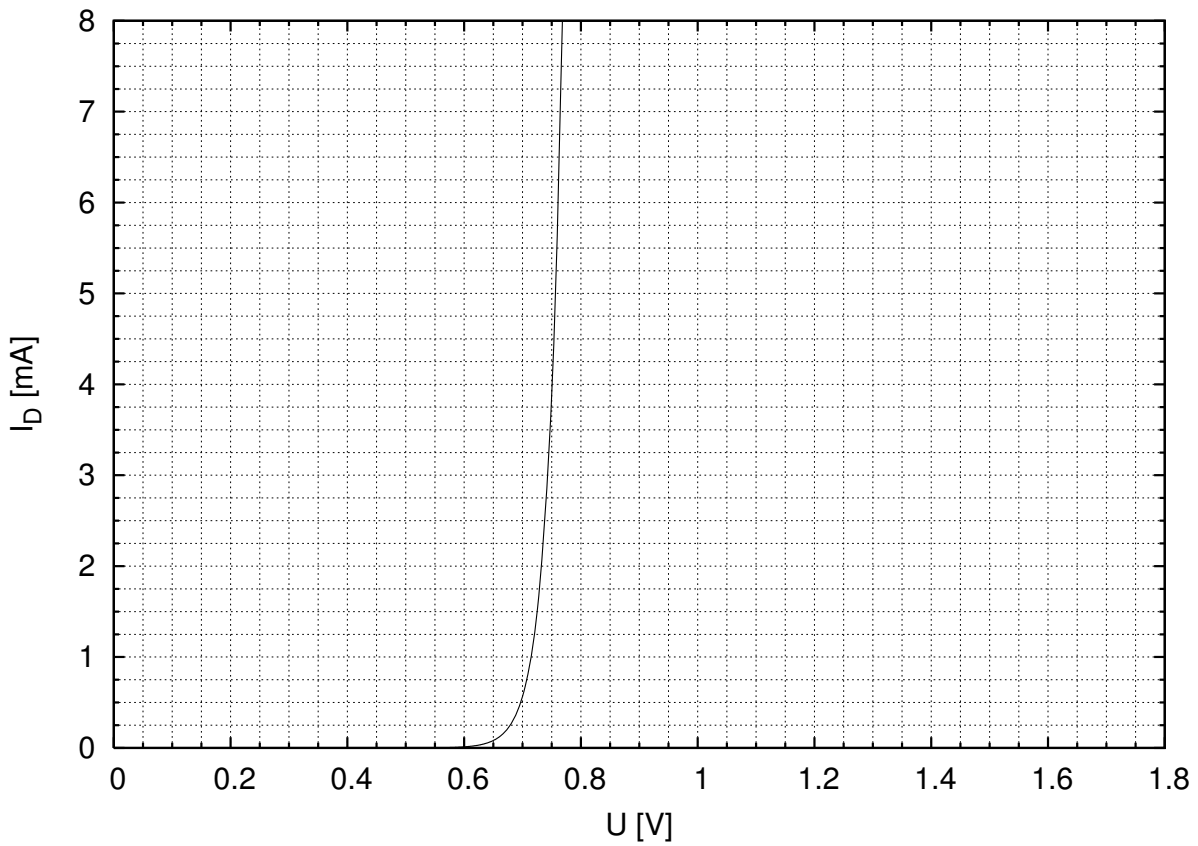


Abb. 2.2: Kennlinie einer Diode

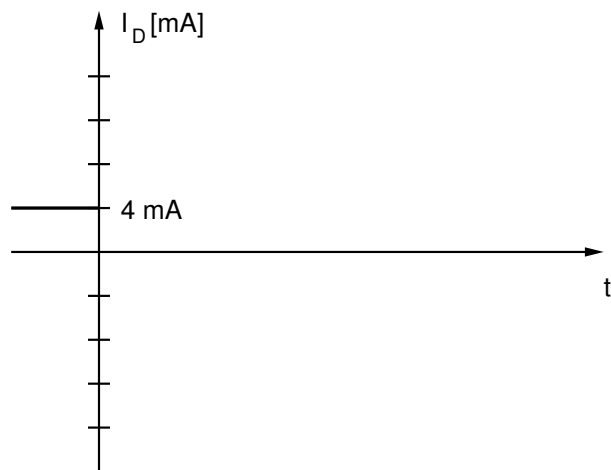


Abb. 2.3: Stromverlauf während des Umschaltvorgangs

Aufgabe 3: Bipolartransistor (20 Punkte)

3.1 Gegeben ist ein npn-Bipolartransistor mit den folgenden technologischen Parametern:

Emitterdotierung	$N_{DE} = 4,8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
Emitterfläche	$A = 20,6 \text{ } \mu\text{m}^2$
effektive Basisweite	$w_B = 100 \text{ nm}$
Diffusionslänge Löcher	$L_{pE} = 75 \text{ nm}$
Temperaturspannung	$U_T = 26 \text{ mV}$
Diffusionskonstante Elektronen	$D_{nB} = 35 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$
Diffusionskonstante Löcher	$D_{pE} = 12,5 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$
Intrinsische Dichte	$n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
Elementarladung	$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$

Der Transistor befindet sich im normal-aktiven Bereich.

- Wie muss die Basisdotierung gewählt werden, damit die Stromverstärkung des Transistors $B_N=112$ beträgt?
- Wie groß ist die Minoritätsträgerkonzentration in der Basis im thermodynamischen Gleichgewicht?
- Zeichnen Sie qualitativ den Verlauf der Elektronenkonzentration in der Basis in Abb. 3.1 ein!
- Wie groß ist die Elektronenkonzentration am basisseitigen Rand der Basis-Emitter-Raumladungszone (RLZ), wenn die Basis-Emitter-Spannung $U_{BE}=752 \text{ mV}$ beträgt?
- Wie groß ist die in der Basis gespeicherte Ladung Q_1 der Minoritätsträger?
- Durch Anlegen einer Kleinsignalspannungsquelle ändert sich die Basis-Emitter-Spannung periodisch zwischen $752 \text{ mV} \leq U_{BE} \leq 770 \text{ mV}$. Wie groß ist die dabei maximal zusätzlich gespeicherte Ladung ΔQ der Minoritäten in der Basis?
- Berechnen Sie mit Hilfe der im vorherigen Aufgabenpunkt bestimmten Ladung die Kleinsignal-Diffusionskapazität C_{DE} des Ersatzschaltbildes nach Giacoletto!
Hinweis: Wenn Sie den Aufgabenpunkt f) nicht lösen konnten, verwenden Sie $\Delta Q = 3,9 \cdot 10^{-16} \text{ As}$
- Aufgrund des Early-Effektes ändert sich der Kollektorstrom in Abhängigkeit von der Kollektor-Emitter-Spannung U_{CE} . Durch welche technologische Maßnahme kann dieser Effekt reduziert werden? Begründen Sie ihre Antwort!

3.2 Ein Transistor mit einem Sperrsättigungsstrom von $I_s = 5 \cdot 10^{-16} \text{A}$ wird in der Beschaltung in Abb. 3.2 betrieben. Der Basisbahnwiderstand ist vernachlässigbar.

- a) Um welche Grundschaltung handelt es sich? Warum wird diese Schaltung so genannt?
- b) In welchem Betriebszustand befindet sich der Transistor, wenn die Basis-Emitter-Spannung $U_{BE}=750 \text{ mV}$ beträgt?

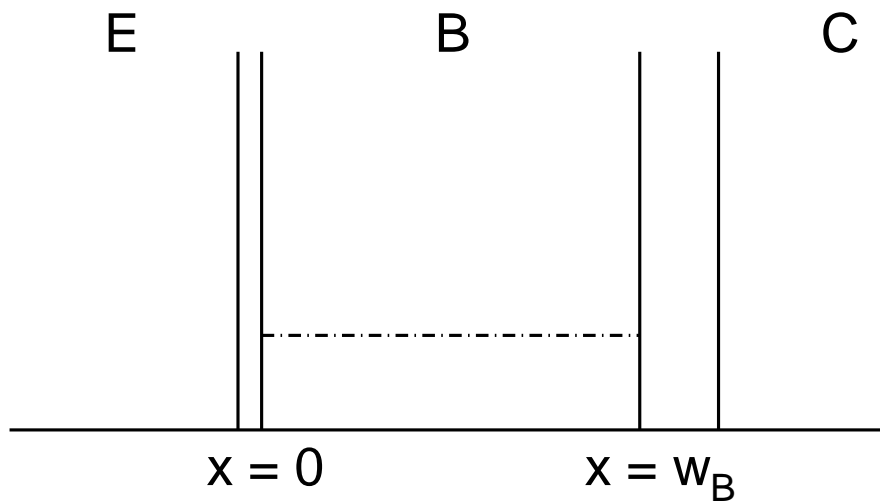


Abb. 3.1: Minoritätsträgerverteilung

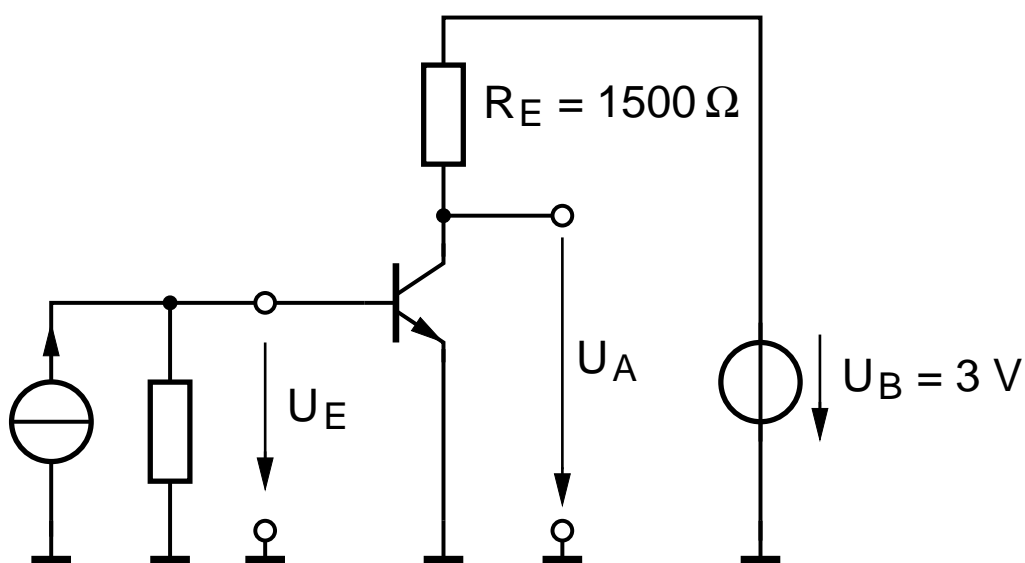
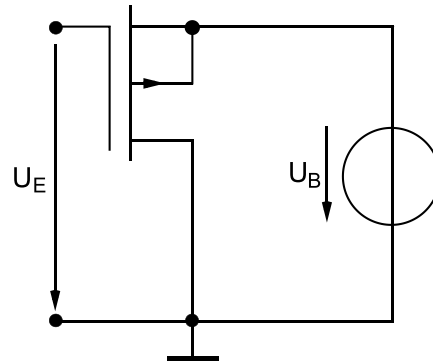
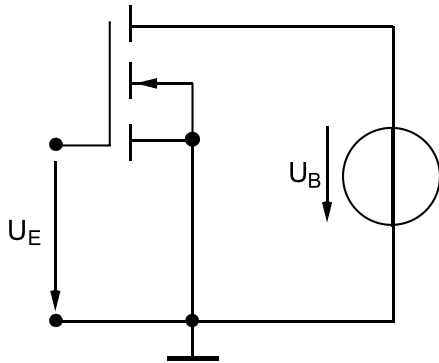


Abb. 3.2: Schaltbild

Aufgabe 4: MOSFET (20 Punkte)

4.1 Gegeben sind zwei beschaltete MOSFETs in Abb. 4.1. U_B ist positiv.



- p-Kanal
- n-Kanal
- selbstleitend
- selbstsperrend

- p-Kanal
- n-Kanal
- selbstleitend
- selbstsperrend

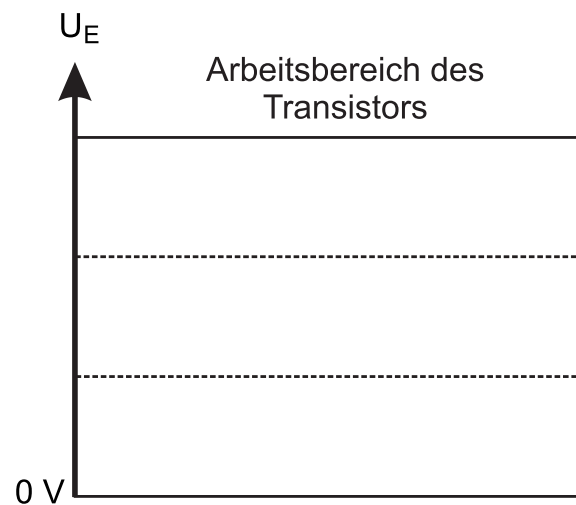
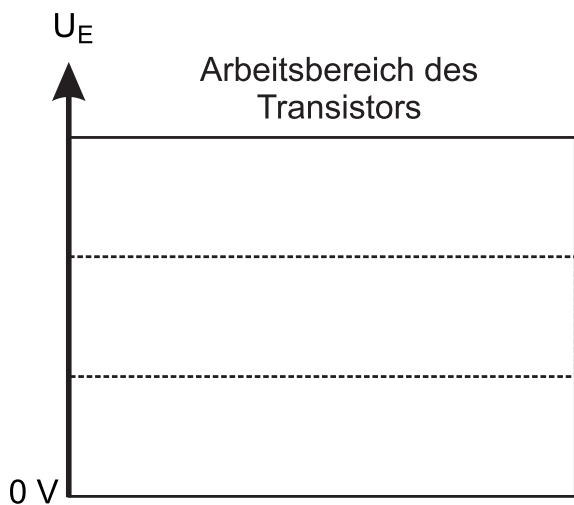


Abb. 4.1: Schaltbilder

- a) Kreuzen Sie in Abb. 4.1 an, um was für Transistor-Varianten es sich jeweils handelt!
Hinweis: Falsche Kreuze führen zu Punktabzug.
- b) Tragen Sie in die Tabellen aus Abb. 4.1 jeweils die drei Arbeitsbereiche ein, welche von den Transistoren, abhängig von der Spannung U_E , durchlaufen werden!

4.2 In Abb. 4.2 ist ein Teil der Kennlinie eines MOSFET gegeben. U_{DS} beträgt 2 V und die Kanallängenmodulation ist vernachlässigbar.

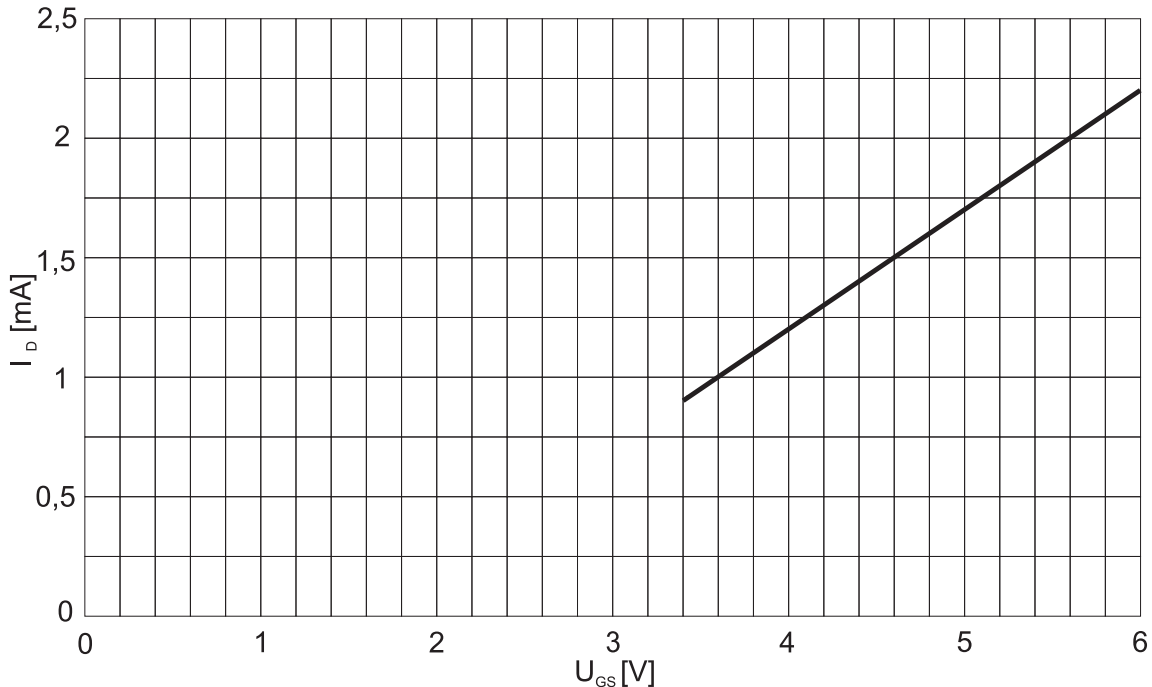


Abb. 4.2: Kennlinie

- a) Wie nennt man das Diagramm in Abb. 4.2?
 - b) Berechnen Sie mittels Abb. 4.2 den Wert der Schwellspannung und der Transistor-kenngröße k !
 - c) Berechnen Sie I_D und U_{GS} für die Punkte, an denen sich der Arbeitsbereich des Transistors ändert!
 - d) Tragen Sie die unter c) berechneten Werte in das Diagramm in Abb. 4.2 ein, und vervollständigen Sie die Kennlinie im Bereich $0 \text{ V} < U_{GS} < 3,4 \text{ V}$!
- 4.3 Der Transistor, dessen Kennlinie in Abb. 4.2 dargestellt ist, wird nun im Arbeitspunkt $U_{GS} = 3,6 \text{ V}$ betrieben.
- a) Welcher Parameter beschreibt die Abhängigkeit des Kleinsignal-Drainstroms von u_{GS} ? Bestimmen Sie diesen für den angegebenen Arbeitspunkt!
 - b) Wie wird der Ausgangs-Leitwert allgemein berechnet? Bestimmen Sie auch diesen für den angegebenen Arbeitspunkt!

c) Wie ändert sich die Kleinsignal-Steilheit ausgehend vom angegebenen Arbeitspunkt mit steigendem U_{GS} ?

Hinweis: Falsche Kreuze führen zu Punktabzug.

- Die Steilheit wird größer.
- Die Steilheit bleibt konstant.
- Die Steilheit wird kleiner.

4.4 Im Folgenden soll eine Drainschaltung bestehend aus einem p-Kanal-MOSFET und einem Lastwiderstand konstruiert werden.

a) Zeichnen Sie das zugehörige Schaltbild! Nutzen Sie die folgenden Größen:

Eingangsspannung	U_E
Ausgangsspannung	U_A
Versorgungsspannung	U_B
Widerstand	R

Aufgabe 1: Resistiver Touchscreen (20 Punkte)

Gegeben sind zwei Widerstandsfilme aus Indiumzinnoxid, die auf einen Glasträger aufgedampft wurden. Diese sollen zur Realisierung eines berührungsempfindlichen Bildschirms (Touchscreen) eingesetzt werden. Die beiden Widerstandsfilme werden mit geringem Abstand so platziert, dass durch eine Berührung ein leitender Kontakt zwischen den Schichten entsteht.

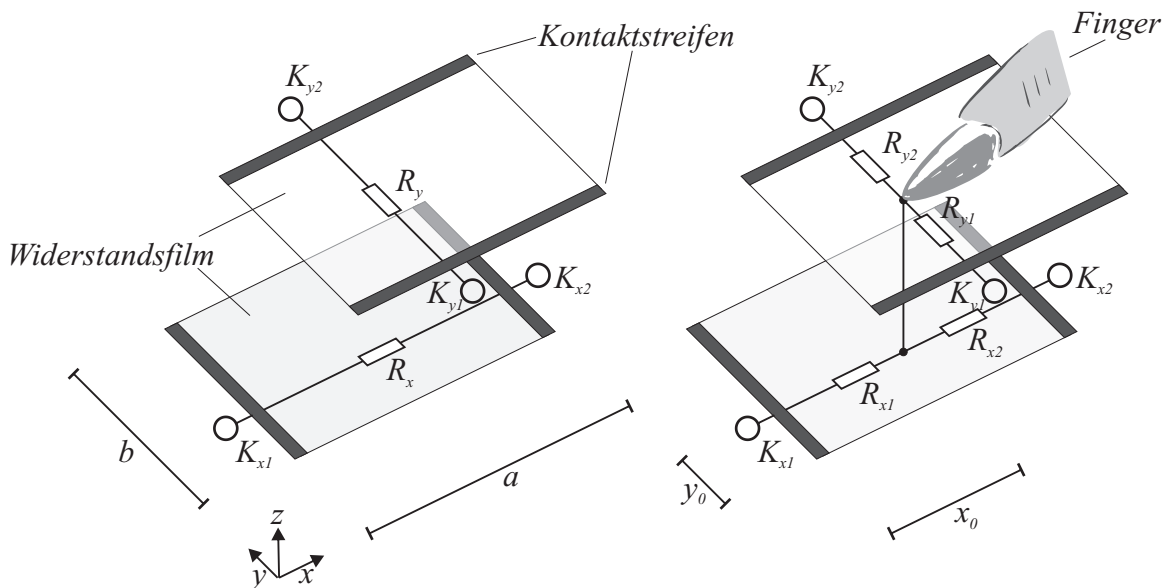


Abb. 1.1: Resistiver Touchscreen ohne und mit Berührung

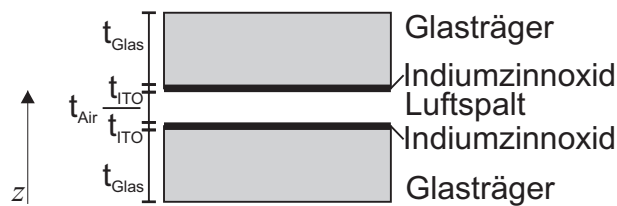


Abb. 1.2: Aufbau der Schichten des Touchscreens

Folgende Daten sind gegeben:

Abmessung in x-Richtung	$a = 400 \text{ mm}$
Abmessung in y-Richtung	$b = 300 \text{ mm}$
Dicke Indiumzinnoxid	$t_{\text{ITO}} = 200 \text{ nm}$
Dicke Luftschicht	$t_{\text{Air}} = 10 \text{ }\mu\text{m}$
Dicke Glasträger	$t_{\text{Glas}} = 100 \text{ }\mu\text{m}$
Spezifischer Widerstand Indiumzinnoxid	$\rho_{\text{ITO}} = 1,9 \cdot 10^{-6} \text{ }\Omega\text{m}$
Dielektrizitätskonstante	$\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}$
Permeabilität im Vakuum	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}$

- 1.1 a) Wie ist allgemein der Flächenwiderstand R_F einer Widerstandsschicht definiert und welche Einheit hat dieser? Welcher Wert für den Flächenwiderstand ergibt sich für die Indiumzinnoxid-Schicht auf dem Glasträger?

$$R_F = \frac{\rho}{t}, \text{ wobei}$$

$$[R_F] = \frac{\Omega}{\square} = \text{Ohm per square}$$

$$\text{Hier ist: } R_{F,ITO} = \frac{\rho_{ITO}}{t_{ITO}} = 9,5 \frac{\Omega}{\square}$$

- b) Berechnen Sie die Gesamtwiderstände R_x und R_y der beiden Schichten, für den Fall, dass der Bildschirm nicht berührt wird!

Mit Hilfe des Flächenwiderstandes R_F lässt sich berechnen:

$$R_x = R_{F,ITO} \frac{a}{b} = 9,5 \frac{\Omega}{\square} \frac{400 \text{ mm}}{300 \text{ mm}} = 12,667 \Omega$$

$$R_y = R_{F,ITO} \frac{b}{a} = 9,5 \frac{\Omega}{\square} \frac{300 \text{ mm}}{400 \text{ mm}} = 7,125 \Omega$$

- 1.2 Nun werde der Touchscreen an der Position x_0, y_0 berührt. Gehen Sie zur Vereinfachung davon aus, dass die Widerstandsschicht bis zum Berührungspunkt auf der vollen Breite wirkt.

- a) Welche Werte ergeben sich für die vier Teilwiderstände R_{x1} , R_{x2} , R_{y1} und R_{y2} in Abhängigkeit von dem Berührungspunkt x_0, y_0 ?

Für die Teilwiderstände ergibt sich:

$$R_{x1} = R_x \frac{x_0}{a} = 31,67 \frac{\Omega}{\text{m}} x_0$$

$$R_{x2} = R_x \frac{a-x_0}{a} = 31,67 \frac{\Omega}{\text{m}} (a - x_0)$$

$$R_{y1} = R_y \frac{y_0}{b} = 23,75 \frac{\Omega}{\text{m}} y_0$$

$$R_{y2} = R_y \frac{b-y_0}{b} = 23,75 \frac{\Omega}{\text{m}} (b - y_0)$$

- b) Zum Messen der Position in x-Richtung wird der Anschluss K_{x1} auf Masse und der Anschluss K_{x2} auf 1 V gelegt. An den Anschlüssen K_{y1} bzw. K_{y2} wird hochohmig die resultierende Spannung gemessen. Welche Spannung stellt sich dort in Abhängigkeit von der Messposition x_0 ein?

Die Spannungen an den Kontakten K_{y1} und K_{y2} sind identisch zu der Spannung am Kontaktierungspunkt, da durch die Widerstände R_{y1} und R_{y2} kein Strom fließt.

$$U_{Ky} = 1 \text{ V} \frac{x_0}{a}$$

Zur Messung der Position in y-Richtung wird analog zu 1.2 b) verfahren, so dass für jede Positionsmessung zwei Messzyklen nötig sind.

- 1.3 Im Folgenden soll eine "worst-case"-Abschätzung für das dynamische Verhalten vorgenommen werden. Hierzu wird der unberührte Touchscreen untersucht.

- a) Berechnen Sie die Kapazität zwischen den beiden Widerstandsschichten als Plattenkondensator!

Die Kapazität zwischen den Widerstandsfilmern ergibt sich zu:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} = \epsilon_0 \cdot 1 \cdot \frac{300 \text{ mm} \cdot 400 \text{ mm}}{10 \mu\text{m}} = 106,25 \text{ nF}$$

- b) Welche Zeitkonstanten τ_x und τ_y ergeben sich für die Messungen in x- bzw. y-Richtung. Gehen Sie in der vereinfachten Betrachtung davon aus, dass die Zeitkonstanten durch die gesamte in a) berechnete Kapazität C und die jeweiligen

Gesamtwiderstände R_x und R_y bestimmt werden.

Die einzelnen Zeitkonstanten ergeben sich zu:

$$\tau_x = R_x C = 1,34 \mu\text{s}$$

$$\tau_y = R_y C = 0,757 \mu\text{s}$$

- c) Am Touchscreen soll 50 mal pro Sekunde eine Positionsmessung vorgenommen werden. Beeinflusst die parasitäre Kapazität zwischen den Widerstandsschichten mit den unter b) berechneten Zeitkonstanten die Messung merklich? Begründen Sie Ihre Antwort!

$$\tau_x + \tau_y = 2,103 \mu\text{s}$$

$$t_{\text{mess}} = \frac{1\text{s}}{50} = 20 \text{ ms}$$

$$\tau_x + \tau_y \ll t_{\text{mess}}$$

Folglich sind die zum Messen benötigten Zeitkonstanten deutlich kleiner, als die zu Verfügung stehende Messzeit t_{mess} . Die Kapazität wirkt sich also nicht merklich aus.

- 1.4 Der Touchscreen soll in einem mobilen Computer eingesetzt werden. Hierzu soll im Folgenden die Verlustleistung abgeschätzt werden. Betrachten Sie weiterhin den unberührten Touchscreen. Parasitäre Kapazitäten sollen jetzt vernachlässigt werden.

- a) Welche momentane Verlustleistung wird statisch in den Widerständen R_x bzw. R_y umgesetzt, wenn über diesen jeweils die Messspannung von 1 V anliegt?

Allgemein ist die Verlustleistung:

$$P = U \cdot I = \frac{U^2}{R}$$

Das ergibt hier:

$$P_x = \frac{1\text{V}^2}{R_x} = 78,95 \text{ mW}$$

$$P_y = \frac{1\text{V}^2}{R_y} = 140,35 \text{ mW}$$

- b) Zur Verringerung der Leistungsaufnahme wird die Messzeit verringert. Welche mittlere Verlustleistung ergibt sich, wenn der Touchscreen 50 mal pro Sekunde ausgelesen wird und Sie davon ausgehen, dass die Messungen in x- bzw. y-Richtung $10\tau_x$ bzw. $10\tau_y$ dauern.

Zur Messung in x- bzw. y-Richtung muss die Arbeit $P_x 10\tau_x$ bzw. $P_y 10\tau_y$ verrichtet werden. Dies über die Zeit t_{mess} . Folglich ergibt sich die mittlere Verlustleistung zu:

$$P_{\text{mittel}} = \frac{P_x 10\tau_x + P_y 10\tau_y}{t_{\text{mess}}} = 106 \mu\text{W}$$

Aufgabe 2: PN-Diode (20 Punkte)

Gegeben ist die Schaltung in Abbildung 2.1 sowie die folgenden Parameter:

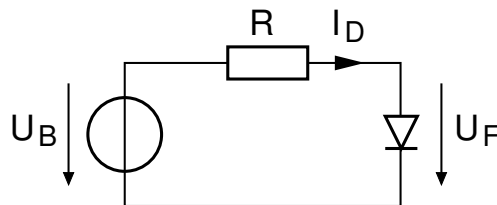


Abb. 2.1: Dioden-Schaltung

Dotierstoffkonzentrationen:	$N_A = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
	$N_D = 1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
intrinsische Dichte	$n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
relative Dielektrizitätskonstante von Silizium	$\epsilon_r = 11,9$
Dielektrizitätskonstante im Vakuum	$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$
Temperaturspannung	$U_T = 26 \text{ mV}$ bei $T = 300 \text{ K}$
Transitzeit	$\tau_T = 10 \text{ ns}$
Elementarladung	$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$
Widerstand	$R = 200 \Omega$

Die Diode befindet sich zunächst im Flussbetrieb mit einem Strom von $I_D = 4 \text{ mA}$.

2.1 Bestimmen Sie die Spannung U_B mit Hilfe einer Arbeitsgeraden!

Die Steigung der Arbeitsgerade ist durch $-1/R$ festgelegt und schneidet die Diodenkennlinie bei $I_D = 4 \text{ mA}$. Der Schnittpunkt mit der Spannungsachse ergibt $U_B = 1,55 \text{ V}$ (s. Abb. 2.2).

2.2 Welchen Sperrsättigungsstrom I_S besitzt die Diode?

$$I_D \approx I_S \exp(U_F/U_T)$$

$$I_S \approx 1,2 \text{ fA}$$

2.3 Berechnen Sie die Weite der Raumladungszone w_{RLZ} !

$$U_D = U_T \cdot \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} = 0,8 \text{ V}$$

$$w_{RLZ} = \sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_r}{e}(U_D - U) \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)} = 44,4 \text{ nm}$$

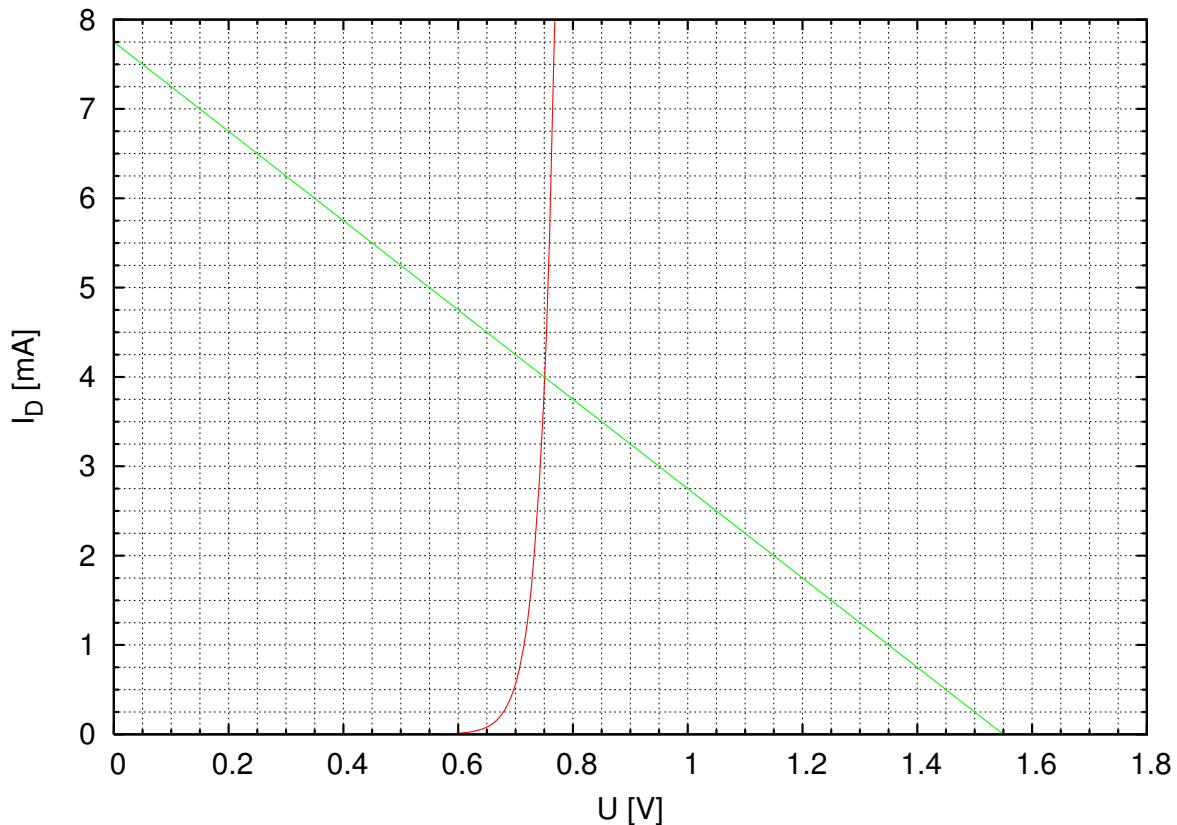


Abb. 2.2: Kennlinie einer Diode und Arbeitsgerade

2.4 Wie groß ist die Ladung im Diffusionsgebiet Q_S ?

$$Q_S = I_D \cdot \tau_T = 40 \text{ pAs}$$

Die Quelle wird zum Zeitpunkt $t = 0$ auf $U_B = -3,25 \text{ V}$ umgeschaltet.

2.5 Wie groß ist der Strom I_D direkt nach dem Umschalten?

Die Diode besitzt nach dem Schalten zunächst ihre Flussspannung $U_F = 0,75 \text{ V}$. Nach "Abbau" der Diffusionsladung Q_S und Umladen der Sperrschichtkapazität stellt sich $U_B = U'_F = -3,25 \text{ V}$ ein,

$$\begin{aligned} U_B &= R \cdot I_D + U_F \\ -3,25 \text{ V} &= 200 \Omega \cdot I_D + 0,75 \text{ V} \\ I_D &= -20 \text{ mA} = -I_R \end{aligned}$$

2.6 Wie ändern sich qualitativ die Weite der Raumladungszone und die Sperrschichtkapazität durch das Umschalten von U_B ? (keine Zahlenwerte)

Hinweis: Betrachten Sie den eingeschwungenen Zustand.

- w_{RLZ} nimmt zu

• C_{Sp} nimmt ab

2.7 Nach welcher Zeit ist Q_S aus Aufgabe 2.4 abgebaut? Wie heißt die Zeit?

$$\begin{aligned}
 Q_S(t = 0) &= 40 \text{ pAs} = Q_{S0} \\
 Q_S(t \rightarrow \infty) &= -\tau_T I_R \quad (\text{theoretischer Wert}) \\
 Q_S(t) &= (Q_{S0} + \tau_T I_R) \exp(-t/\tau_T) - \tau_T I_R \stackrel{!}{=} 0 \\
 t_s &= \tau_T \ln \frac{I_R + I_D}{I_R} = 1,82 \text{ ns}
 \end{aligned}$$

t_s ist die Speicherzeit.

2.8 Skizzieren Sie in Abbildung 2.3 den Verlauf von I_D !

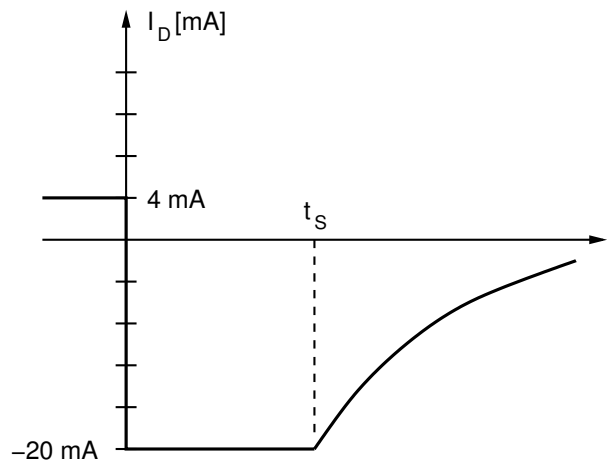


Abb. 2.3: Stromverlauf während des Umschaltvorgangs

Aufgabe 3: Bipolartransistor (20 Punkte)

3.1 Gegeben ist ein npn-Bipolartransistor im normal-aktiven Bereich.

a)

$$B_N = \frac{D_{nB} \cdot N_{DE} \cdot L_{pE}}{D_{pE} \cdot N_{AB} \cdot w_B} \Rightarrow N_{AB} = \frac{D_{nB} \cdot N_{DE} \cdot L_{pE}}{D_{pE} \cdot B_N \cdot w_B} = 9 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3} \quad (3.1)$$

b)

$$n_{B0} = \frac{n_i^2}{N_{AB}} = 250 \text{ cm}^{-3} \quad (3.2)$$

c)

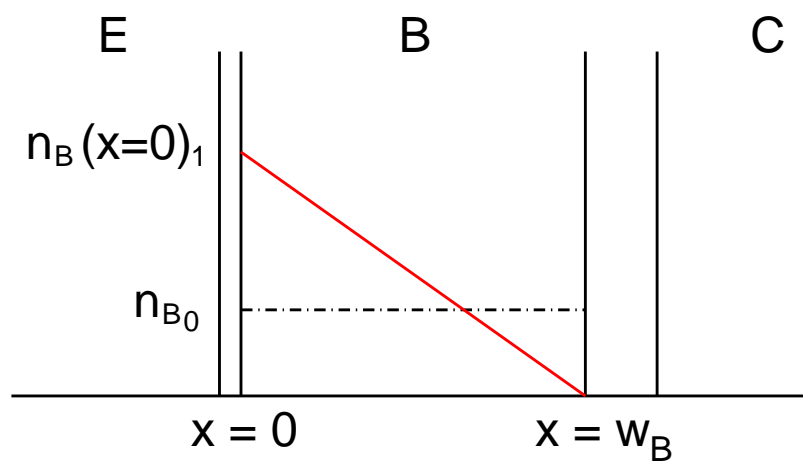


Abb. 3.1: Minoritätsträgerverteilung

d)

$$n_B(x=0)_1 = n_{B0} \cdot e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} = 9,1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3} \quad (3.3)$$

e)

$$Q_{752\text{mV}} = \frac{1}{2} e A w_B n_B(x=0)_1 = 1,5 \cdot 10^{-16} \text{ As} \quad (3.4)$$

f)

$$\begin{aligned} \Delta Q &= Q_{770\text{mV}} - Q_{752\text{mV}} \\ &= \frac{1}{2} e A w_B n_{B0} \left(e^{\frac{U_{BE2}}{U_T}} - e^{\frac{U_{BE1}}{U_T}} \right) \\ &= 1,5 \cdot 10^{-16} \text{ As} \end{aligned}$$

g)

$$C_{DE} = \left| \frac{\Delta Q}{\Delta U_{BE}} \right| = 8,33 \text{ fF}$$

$$C_{DE} = 21,67 \text{ fF} \quad \text{mit } \Delta Q = 3,9 \cdot 10^{-16} \text{ As}$$

h) Wird die Spannung U_{CE} vergrößert und U_{BE} konstant gehalten, so vergrößert sich auch die Sperrspannung U_{BC} . Dadurch vergrößert sich die RLZ des Basis-Kollektor-Übergangs. Wegen der größeren Ausbreitung der RLZ ins Basisbahngebiet, wird die effektive Basisweite w_B kleiner. Das führt nach Aufgabenpunkt a) zu einer erhöhten Stromverstärkung. Bei konstantem Basisstrom I_B ergibt sich somit ein größerer Kollektorstrom $I_C = \beta_N \cdot I_B$.

Die Ausweitung der RLZ in die Basis kann dadurch reduziert werden, indem das Kollektorgebiet schwächer dotiert wird: $w_p \cdot N_{AB} = w_n \cdot N_{DC}$. Als Konsequenz ergibt sich aber ein größerer Widerstand des Kollektorbahngebietes.

3.2 a) Emitterschaltung, da das Potential am Emitter konstant ist. Der Eingang liegt an der Basis, der Ausgang am Kollektor. Für beide Knoten stellt der Emitter ein festes Bezugspotential dar.

b) Annahme: Der Transistor befindet sich im normal-aktiven-Bereich, also muss die Basis-Kollektor-Diode gesperrt sein.

$$\Rightarrow I_C = I_S \cdot \left(e^{\frac{U_{bE}}{U_T}} - 1 \right) = 1,685 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow U_{CE} = 3 \text{ V} - I_C \cdot R_L = 472 \text{ mV}$$

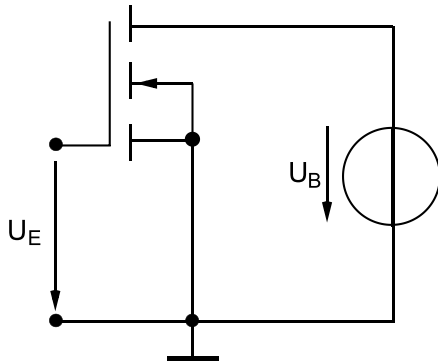
$$\Rightarrow U_{CE} < U_{bE}$$

$$\Rightarrow U_{bC} > 0 \Rightarrow \text{Basis - Kollektor - Diode nicht gesperrt}$$

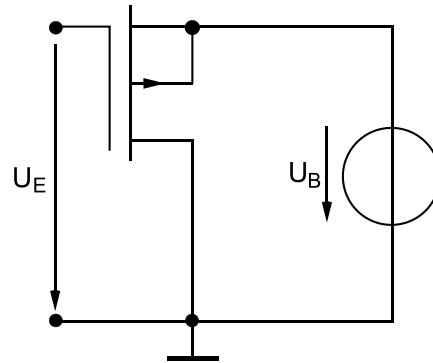
Der Transistor befindet sich nicht wie angenommen im normal-aktiven-, sondern im Sättigungsbereich.

Aufgabe 4: MOSFET (20 Punkte)

4.1 Gegeben sind zwei beschaltete MOSFETs in Abb. 4.1.



- p-Kanal
- n-Kanal
- selbstleitend
- selbstsperrend



- p-Kanal
- n-Kanal
- selbstleitend
- selbstsperrend

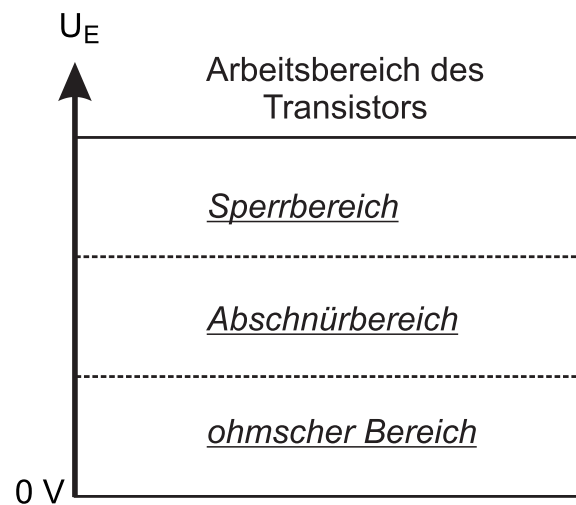
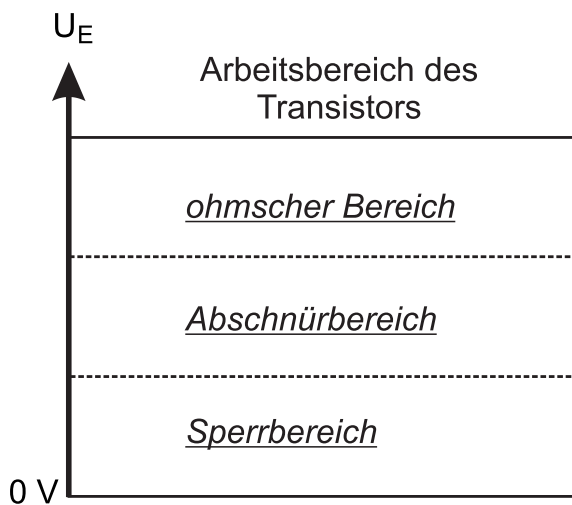


Abb. 4.1: Schaltbilder

- a) Siehe Abb. 4.1.
- b) Siehe Abb. 4.1.

4.2 a) Eingangskennlinie

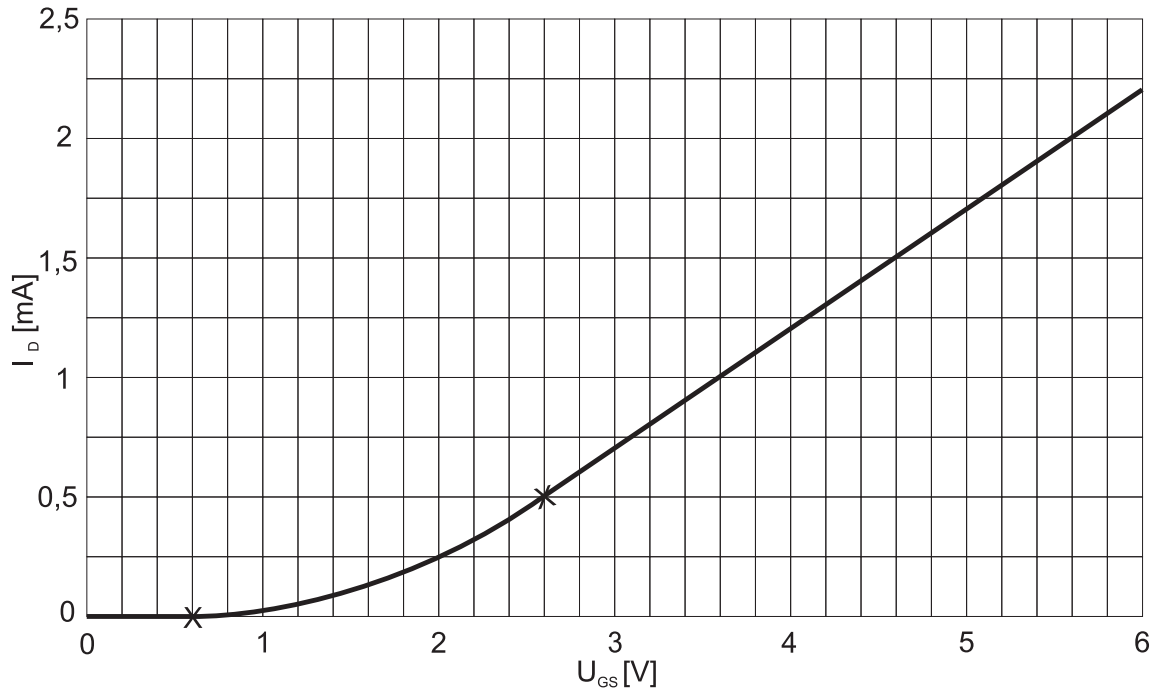


Abb. 4.2: Kennlinie

b) Aus 2 Punkten des ohmschen Bereiches:

$$I_D(3,6 \text{ V}) = 1 \text{ mA}, I_D(5,6 \text{ V}) = 2 \text{ mA}$$

$$\Rightarrow I_D(5,6 \text{ V}) = 2I_D(3,6 \text{ V})$$

$$\Rightarrow 2k[(3,6 \text{ V} - U_{th})2 \text{ V} - 2 \text{ V}] = k[(5,6 \text{ V} - U_{th})2 \text{ V} - 2 \text{ V}]$$

$$\Rightarrow U_{th} = 0,6 \text{ V} \Rightarrow k = 0,25 \text{ mA/V}^2$$

c) $I_D(U_{GS} = U_{th}) = 0 \text{ A}$ und $U_{DS,sat} = U_{GS} - U_{th} \Leftrightarrow U_{GS} = 2,6 \text{ V} \rightarrow I_D(2,6 \text{ V}) = 0,5 \text{ mA}$

d) Siehe Abb. 4.1.

4.3 a) $g_m = \frac{\delta I_D}{\delta U_{GS}} = kU_{DS} = 0,5 \text{ mS}$

b) (nur CPO) $g_{DS} = \frac{\delta I_D}{\delta U_{DS}} = k((U_{GS} - U_{th}) - U_{DS}) = 0,25 \text{ mS}$

c) (nur CPO)

- Die Steilheit wird größer.
- Die Steilheit bleibt konstant.
- Die Steilheit sinkt.

4.4 Im Folgenden soll eine Drainschaltung bestehend aus einem p-Kanal-MOSFET und einem Lastwiderstand konstruiert werden.

a) Zeichnen Sie das zugehörige Schaltbild! Nutzen Sie die folgende Größen:

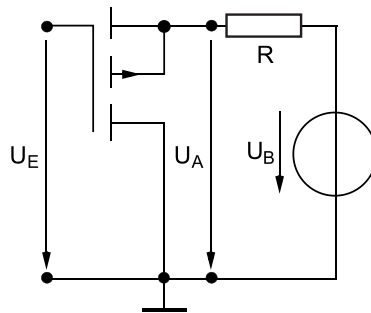


Abb. 4.3: Kennlinie