

Aufgabe 1: Integrierter Kondensator (20 Punkte)

1.1 Kondensator

- Skizzieren Sie das vollständige ESB eines realen Kondensators mit 6 Elementen und bezeichnen sie die Elemente!
- Beschreiben Sie stichwortartig die Bedeutung der Elemente!
- Vereinfachen Sie das ESB auf 4 Elemente!

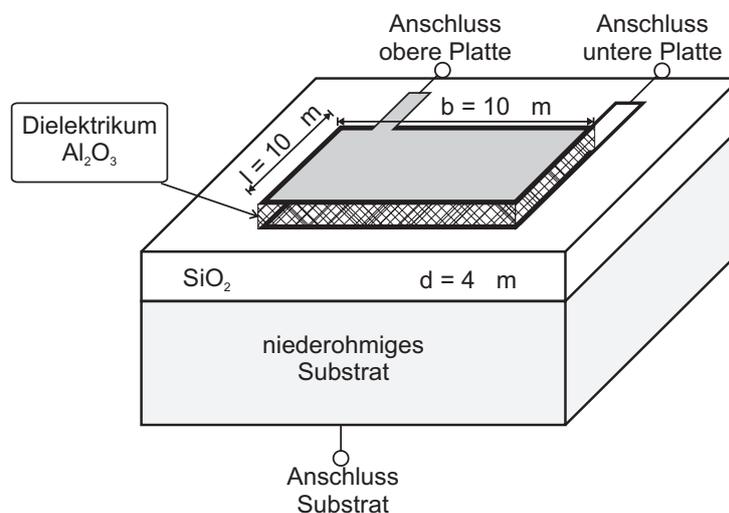


Abbildung 1.1: Prinzipieller Aufbau eines integrierten MIM-Kondensators.

Um Kapazitäten hoher Güte in integrierten Schaltungen zu realisieren, wird häufig ein Dielektrikum zwischen zwei großflächigen Metallplatten verwendet. Diese vom Plattenkondensator abgeleitete Realisierung wird als MIM-Kondensator bezeichnet (**M**etall-**I**solator-**M**etall) und ist in Abb 1.1 dargestellt. Die beiden Kondensatorplatten sind als rechteckige Metallflächen ausgeführt, zwischen denen sich Aluminiumoxid (Al_2O_3) als Dielektrikum befindet. Unterhalb der unteren Metallplatte ist zunächst eine Siliziumdioxid-Schicht (SiO_2) und darunter ein niederohmiges Substrat, welches als ideal leitend angenommen werden kann. Sowohl die untere Metallebene als auch der Substratanschluss sind zunächst ideal mit Masse verbunden.

Folgende Daten sind gegeben:

Breite des Kondensators	$b = 10 \mu\text{m}$
Länge des Kondensators	$l = 10 \mu\text{m}$
Dicke SiO_2	$d_{\text{SiO}_2} = 4 \mu\text{m}$
relative Dielektrizitätszahl SiO_2	$\epsilon_{r,\text{SiO}_2} = 3,9$
relative Dielektrizitätszahl Al_2O_3	$\epsilon_{r,\text{Al}_2\text{O}_3} = 8,5$
Dielektrizitätskonstante	$\epsilon_0 = 8,8542 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}$

- 1.2 a) Die Verläufe des Betrags und der Phase der Eingangsimpedanz sind in Abb 1.2 dargestellt. Ermitteln Sie daraus die Werte aller vier ESB-Elemente aus Aufg. 1.1 c)!
- b) Welche Güte hat dieser Kondensator bei $f = 10 \text{ GHz}$?
Hinweis: Die Güte lässt sich aus der Phase in Abb 1.2 bestimmen!
- c) Wie groß ist die Dicke d des Aluminiumoxids (Al_2O_3)?
- 1.3 Die in Abb. 1.1 angedeutete Zuleitung zur oberen Platte ist $50 \mu\text{m}$ lang, $0,3 \mu\text{m}$ breit und $0,3 \mu\text{m}$ dick. Bestimmen Sie deren Flächenwiderstand R_F und den spez. Widerstand ρ des Metalls!
Hinweis: Falls Sie in 1.2 a) den Zuleitungswiderstand nicht bestimmen konnten, rechnen Sie mit $R = 10 \Omega$.
- 1.4 Im Folgenden ist die untere Metallplatte nicht mehr mit Masse verbunden. Das Substrat kann weiterhin als ideal leitend angenommen werden.
- a) Geben Sie ein Ersatzschaltbild an, welches die Kapazität zwischen der untern Metallplatte und Substrat (Substratkapazität) und deren Verluste berücksichtigt!
Hinweis: Gehen Sie hierzu von dem ESB aus 1.1 c) aus und erweitern Sie es um 2 Elemente.
- b) Berechnen Sie die Substratkapazität!
- c) Berechnen Sie das Verhältnis aus Nutzkapazität und Substratkapazität!

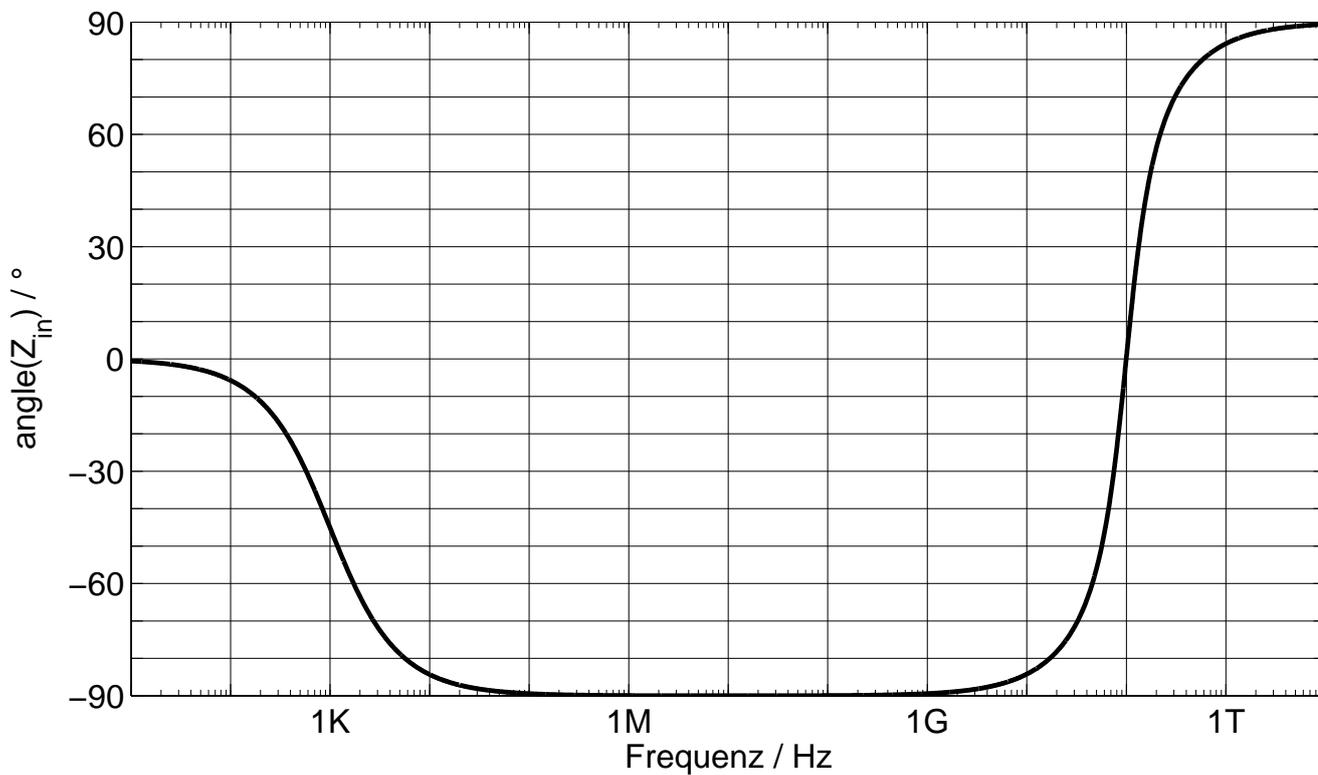
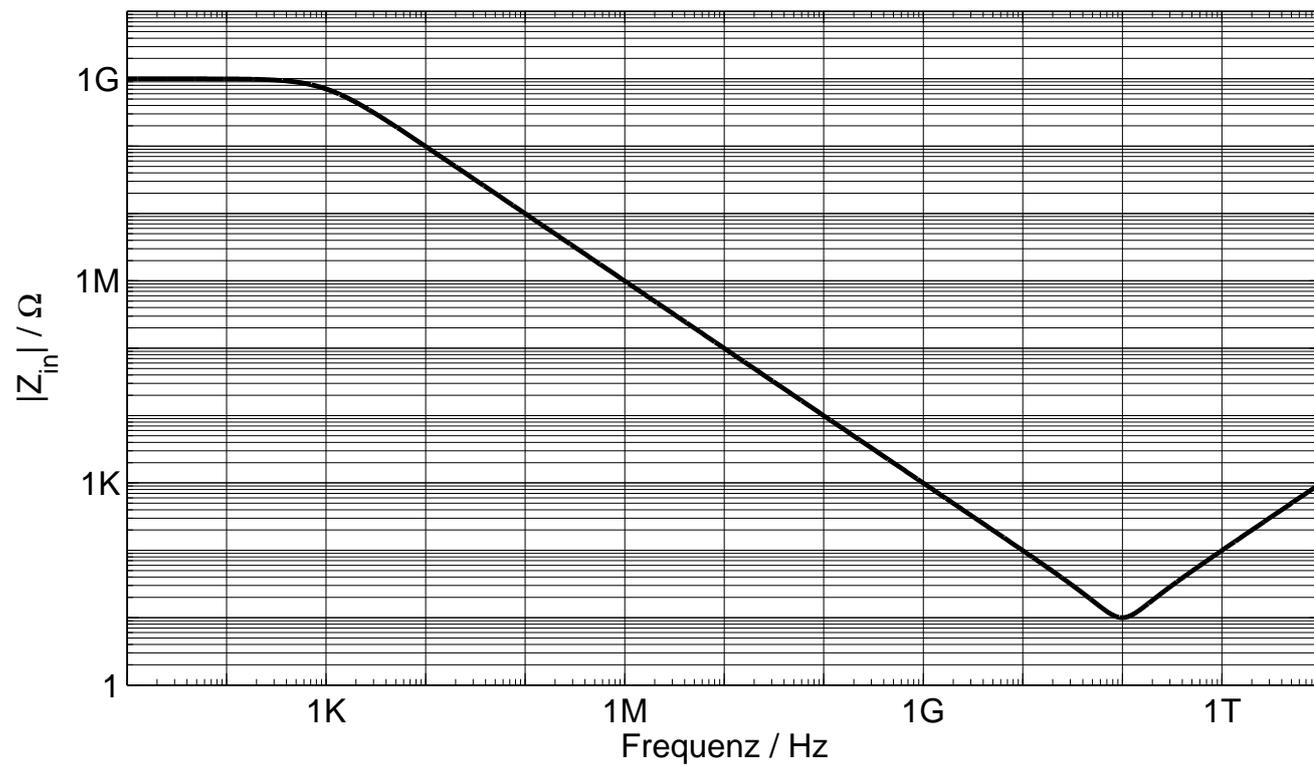


Abbildung 1.2: Verläufe von Betrag und Phase der Eingangsimpedanz.

Zusatzblatt zur Aufgabe

Aufgabe 2: PN-Diode (20 Punkte)

Gegeben ist die Anordnung in Abbildung 2.1, die den Signaleingang der Schaltung vor Überspannung (z.B. elektrostatische Entladung) schützt. Die Dioden D_1 und D_2 sind identisch und sperren im normalen Betrieb. Der Signaleingang kann als **Leerlauf** angenommen werden.

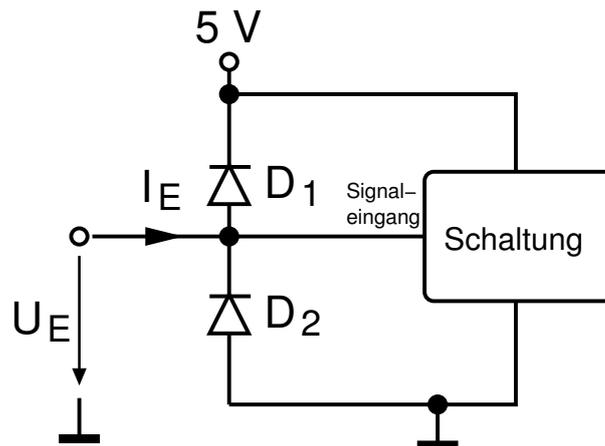


Abbildung 2.1: Schutzschaltung eines hochohmigen Eingangs

Folgende Parameter sind gegeben:

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

$$\epsilon_r = 12$$

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

$$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$$

Querschnittsfläche der Diode

$$A = 100 \mu\text{m}^2$$

2.1 Berechnen Sie die Diffusionsspannung der Dioden!

2.2 Bestimmen Sie den Sperrsättigungsstrom aus Abbildung 2.2!

2.3 In welchem Spannungsbereich liegt U_E , wenn der Strom $|I_E| < 100 \text{ mA}$ ist? Es tritt kein Durchbruch auf!

Hinweis: Verwenden Sie $I_S = 1 \text{ pA}$, falls Sie Aufgabe 2.2 nicht lösen konnten.

2.4 Die Eingangsspannung beträgt nun $U_E = 0 \text{ V}$.

a) Berechnen Sie die Weite der Raumladungszonen der Dioden D_1 und D_2 ! Bestimmen Sie das Verhältnis w_n/w_p !

b) Berechnen Sie die Sperrschichtkapazität $C_{SP,1}$ der Diode D_1 ! Welche der beiden Dioden besitzt die größere Sperrschichtkapazität?

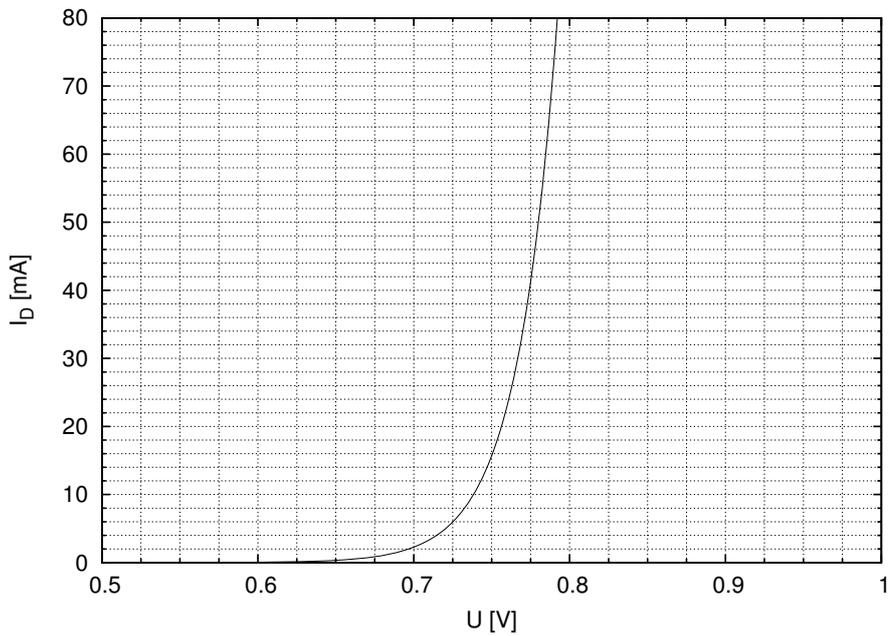


Abbildung 2.2: Dioden-Kennlinie

c) Zeichnen Sie in Abbildung 2.3 qualitativ w_n und w_p sowie den Verlauf des E-Feldes von Diode D_1 ein!

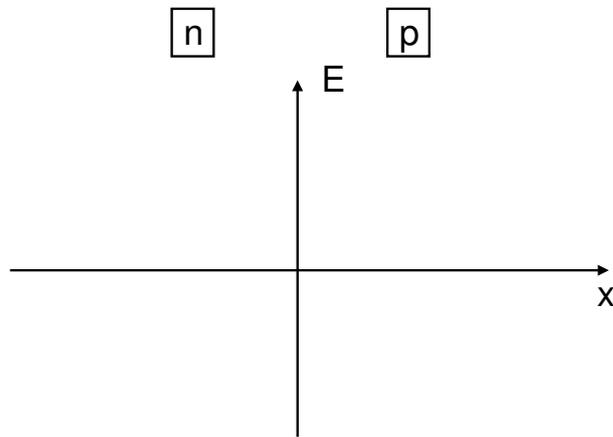


Abbildung 2.3: E-Feld innerhalb der Sperrschicht der Diode D_1 .

Zusatzblatt zur Aufgabe

Aufgabe 3: Bipolartransistor (20 Punkte)

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

Emitterdotierung	N_{DE}	=	$6,2 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
Emitterfläche	A	=	$29 \mu\text{m}^2$
Basisweite	$w_{B,0}$	=	130 nm
Diffusionslänge Löcher	L_{pE}	=	65 nm
Dotierungsverhältnis Kollektor/Basis	N_{DC}/N_{AB}	=	$0,25$
Temperaturspannung	U_T	=	26 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	=	$1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As}$

- 3.1 Der Transistor wird in einen Arbeitspunkt im normal-aktiven Bereich gebracht: die Basis-Emitter-Spannung beträgt $U_{BE} = 900 \text{ mV}$, und die Kollektor-Emitter-Spannung $U_{CE1} = 2,8 \text{ V}$. Der schematische Aufbau des Transistors ist in Abb. 3.1 dargestellt. Die Ausdehnung der Basis-Kollektor-Raumladungszone (BC-RLZ) in das Basisgebiet hinein beträgt im angegebenen Arbeitspunkt $w_p = 15 \text{ nm}$. Die Basis-Emitter-RLZ soll vernachlässigt werden.

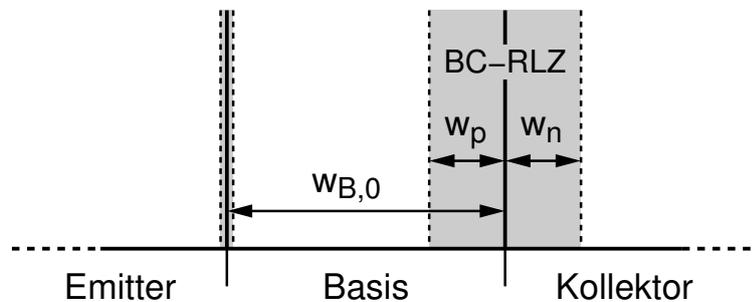


Abbildung 3.1: Schematischer Aufbau des Bipolartransistors.

- Erläutern Sie kurz, was die Transitfrequenz f_T angibt, und berechnen Sie diese!
- Der Transistor besitzt im angegebenen Arbeitspunkt eine Stromverstärkung von $B_N = 91$. Bestimmen Sie den Wert seiner Kollektordotierung!
- Wie groß ist die Minoritätsträgerkonzentration in der Basis im thermodynamischen Gleichgewicht?
- Wie groß ist die in der Basis gespeicherte Ladung Q_1 der Minoritätsträger im Arbeitspunkt?

3.2 Nun erfolgt eine Kleinsignalansteuerung des Transistors: Bei unverändertem U_{BE} wird die Kollektor-Emitter-Spannung zwischen $U_{CE1} = 2,8 \text{ V}$ und $U_{CE2} = 2,4 \text{ V}$ variiert. Bei U_{CE2} beträgt die in der Basis gespeicherte Minoritätsträgerladung $Q_2 = 60,8 \text{ fC}$. **Hinweis:** Falls Sie in Aufg. 3.1 d) die Ladung Q_1 im Arbeitspunkt U_{CE1} nicht bestimmen konnten, können Sie im Folgenden den Wert $Q_1 = 58 \text{ fC}$ verwenden.

- Ist die BC-RLZ bei U_{CE2} kleiner oder größer als bei U_{CE1} ? Begründen Sie Ihre Antwort!
- Der Transistor soll durch ein Kleinsignalersatzschaltbild (KS-ESB) beschrieben werden. Wie lautet die genaue Bezeichnung des KS-ESB-Elements, dessen Größe durch den Quotienten

$$\left. \frac{Q_2 - Q_1}{U_{CE2} - U_{CE1}} \right|_{U_{BE}=\text{konst.}}$$

beschrieben wird?

- Zeichnen Sie das KS-ESB des Transistors nach Giacoletto! Geben Sie an, durch welches Bauelement der Quotient aus Aufg. 3.2 b) mitberücksichtigt wird!
- Welcher physikalische Effekt wird durch die Basis-Emitter-Diffusionskapazität C_{DE} beschrieben?
- Berechnen Sie den Wert von C_{DE} !
- Ermitteln Sie die Differenz der Kollektorströme in den Punkten U_{CE1} und U_{CE2} !
- Bestimmen Sie den Early-Leitwert der Transistors! Dazu können Sie alle übrigen Widerstände des KS-ESB vernachlässigen.

Zusatzblatt zur Aufgabe

Aufgabe 4: MOSFET (20 Punkte)

Die Aufgabenpunkte sind unabhängig voneinander lösbar. Bei Multiple-Choice Aufgabenpunkten können mehrere Antworten richtig sein. Falsche Kreuze führen zu Punktabzug.

4.1 Gegeben ist ein in Silizium-Technologie hergestellter, integrierter p-Kanal MOSFET.

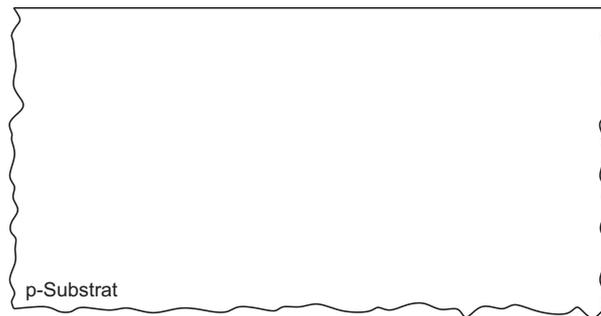


Abbildung 4.1: p-Substrat / Querschnitt eines p-Kanal MOSFET

- a) Zeichnen Sie in Abb. 4.1 den Querschnitt des p-Kanal-MOSFETS ein. Ergänzen Sie dazu das bereits dargestellte p-Substrat durch dotierte Gebiete, SiO_2 und Metalle bzw. Polysilizium! Kennzeichnen Sie zudem Materialien und Dotierungen eindeutig!
 - b) Kennzeichnen und beschriften Sie die vier Anschlüsse des Transistors!
 - c) Welche Ladungsträger sind in diesem Bauelement für den Stromtransport verantwortlich?

Elektronen Löcher Beides
 - d) Zeichnen Sie in Ihren Querschnitt aus Abb. 4.1 den Kanalverlauf ein, wenn $U_{\text{DS}} = U_{\text{GS}} - U_{\text{th}}$ gilt und skizzieren Sie die Raumladungszone!
- 4.2 Bei einem MOSFET wird die in Abb. 4.2 dargestellte Steuerkennlinie bei einer Drain-Source-Spannung von $U_{\text{DS}} = -1\text{V}$ gemessen. Die Kanallängenmodulation sei zu vernachlässigen.
- a) Welcher Strom und welche Spannung sind im Diagramm 4.2 gegeneinander aufgetragen? Ergänzen Sie die entsprechenden Indizes!

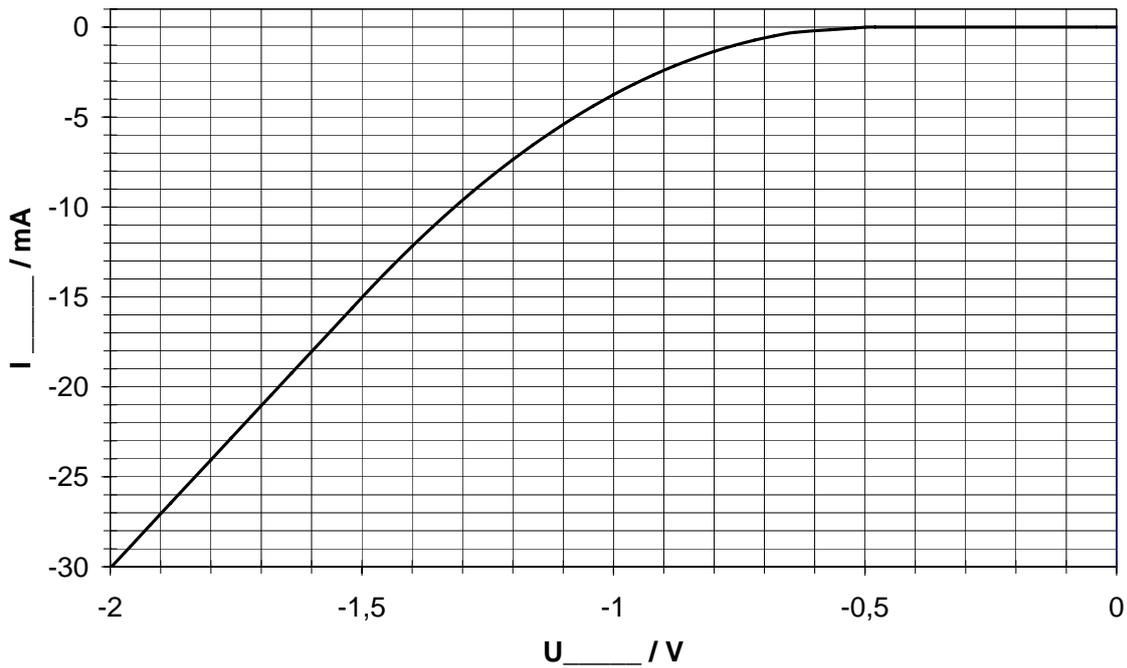


Abbildung 4.2: Steuerkennlinie

- b) Um welchen Typ MOSFET handelt es sich?
 N-Kanal P-Kanal Selbstsperrend Selbstleitend
- c) Bestimmen Sie mittels Abb. 4.2 den Wert der Schwellspannung und der Transistor-
 kenngroÙe k !
Hinweis: U_{th} ist glatt durch 100 mV teilbar!

Der Transistor, dessen Kennlinie in Abb. 4.2 dargestellt ist, wird nun bei $U_{DS} = -0,5$ V betrieben.

- d) Berechnen Sie I_D und U_{GS} für die Punkte, an denen sich der Arbeitsbereich des Transistors unter den neuen Vorgaben ändert und ergänzen Sie die Tabelle!

Bezeichnung des Punktes	I _D	U _{GS}
Zusätzliche Stützstelle		-2 V

- e) Tragen Sie die berechneten Werte in das Diagramm in Abb. 4.2 ein und zeichnen Sie die neue Kennlinie!

- 4.3 Ein n-Kanal MOSFET soll in einer Grundsaltung betrieben werden. Die positive Versorgungsspannung ist $U_B = 2\text{ V}$, U_{in} ist die Eingangsspannung bestehend aus einem Kleinsignal und einer Offset-Spannung von 500 mV. Der Transistor hat eine Transistorkenngröße von $k = 20\text{ mA/V}^2$, die Schwellspannung ist $U_{th} = 300\text{ mV}$ und die Kanallängenmodulation sei zu vernachlässigen.

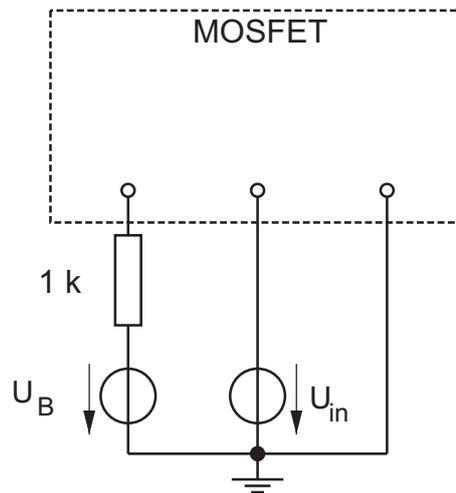


Abbildung 4.3: Schaltbild

- a) Mit welcher MOSFET-Grundsaltung lässt sich sowohl eine hohe Spannungsverstärkung als auch eine große Eingangsimpedanz erzielen?
- Sourceschaltung Emitterfolger Drainschaltung
 Gateschaltung Bulkschaltung Operationsverstärker
- b) Ergänzen Sie Abb. 4.3 mit dem Symbol eines selbstsperrenden MOSFETs zu dieser Grundsaltung. Beschriften Sie hierbei auch die vier Anschlüsse des Transistors und zeichnen Sie die Ausgangsspannung U_A ein!
- c) Welcher Parameter beschreibt die Abhängigkeit des Kleinsignal-Drainstroms von u_{GS} ?
- d) Wie ändert sich die Kleinsignal-Steilheit ausgehend vom angegebenen Arbeitspunkt mit sinkendem U_{GS} ?
- Steilheit wird größer. Steilheit bleibt konstant. Steilheit wird kleiner.
- e) Die Versorgungsspannung wird nun verdreht angelegt und ist daher negativ. Welche Grundsaltung ergibt sich?
- Sourceschaltung Emitterfolger Drainschaltung
 Gateschaltung Bulkschaltung Operationsverstärker
- f) Was ist jetzt in Bezug auf den Bulkanschluss zu beachten, damit die neue Schaltung fehlerfrei funktionieren kann?

Aufgabe 1: Integrierter Kondensator (CPO & DPO: 20 Punkte)

1.1 Kondensator

- a) Skizzieren Sie das vollständige ESB eines realen Kondensators mit 6 Elementen und bezeichnen sie die Elemente!

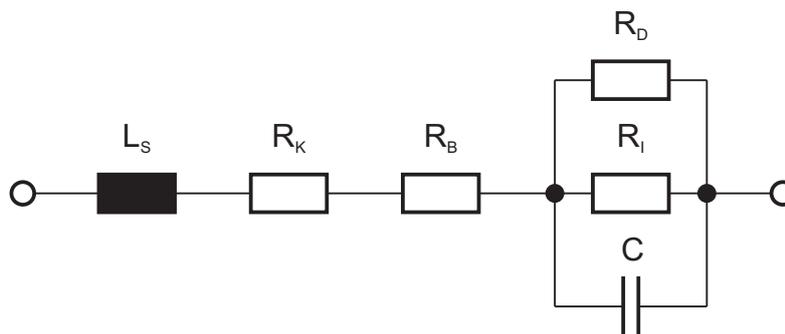


Abb. 1.1: Vollständiger Ersatzschaltbild eines realen Kondensators aus 6 Elementen

- b) Beschreiben Sie stichwortartig die Bedeutung der Elemente!
- | | | |
|-------|----------------------------------|--|
| L_S | Serieninduktivität | Induktivität der Zuleitung und der Platten |
| R_K | Kontaktwiderstand | Widerstand des Kontaktes und der Zuleitungen |
| R_B | Bahnwiderstand | Widerstand der Kondensatorbahn |
| R_D | dielektrischer Verlustwiderstand | Polarisationsverluste im Dielektrikum |
| R_I | Isolationswiderstand | ohmsche Isolationsverluste (Leckstrom) |
| C | Nennkapazität | |
- c) Vereinfachen Sie das ESB auf 4 Elemente!

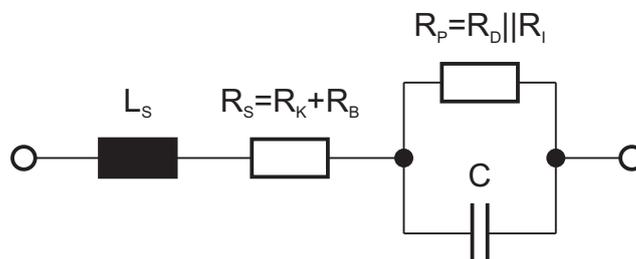


Abb. 1.2: Vereinfachtes Ersatzschaltbild eines realen Kondensators aus 4 Elementen

- 1.2 a) ... Ermitteln Sie daraus die Werte aller vier ESB-Elemente aus Aufg. 1.1 c)!

$$f = 0 \implies |Z_{in}| \approx R_P = 1 \text{ G}\Omega$$

$$\begin{aligned}
 f = 1 \text{ MHz} &\implies |Z_{in}| \approx \frac{1}{\omega C} = 1 \text{ M}\Omega \\
 &\implies C = \frac{1}{2\pi \cdot 1 \text{ MHz} \cdot 1 \text{ M}\Omega} = 159,155 \text{ fF} \\
 f_{res} = 100 \text{ GHz} &\implies f_{res} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_S C}} \\
 &\implies L_S = \frac{1}{C (2\pi \cdot 100 \text{ GHz})^2} = 15,9155 \text{ pH} \\
 f_{res} = 100 \text{ GHz} &\implies |Z_{in}| \approx R_S = 10 \Omega
 \end{aligned}$$

b) Welche Güte hat dieser Kondensator bei $f = 10 \text{ GHz}$?

1. Möglichkeit: Berechnung aus der Phase von Z_{in}

$$\begin{aligned}
 \varphi(10 \text{ GHz}) &\approx -85^\circ \implies \delta_C = 90^\circ + \varphi = 5^\circ \\
 \implies Q &= \frac{1}{\tan \delta_C} = 11,43
 \end{aligned}$$

2. Möglichkeit: Berechnung aus Ersatzschaltbild

$$Q = \frac{\text{Im}(Z_{in})}{\text{Re}(Z_{in})} = \frac{\omega C R_p^2 - \omega L_s (1 + (\omega C R_p)^2)}{R_s (1 + (\omega C R_p)^2) + R_p} = 9,852$$

c) Wie groß ist die Dicke d des Aluminiumoxids (Al_2O_3)?

Betrachtung der Kapazität als Plattenkondensator

$$\begin{aligned}
 C &= \varepsilon_0 \varepsilon_{r, \text{Al}_2\text{O}_3} \frac{l b}{d} \\
 \implies d &= \varepsilon_0 \varepsilon_{r, \text{Al}_2\text{O}_3} \frac{l b}{C} = 47,288 \text{ nm}
 \end{aligned}$$

1.3 ...Bestimmen Sie deren Flächenwiderstand R_F und den spez. Widerstand ρ des Metalls.

Allgemein:

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{\rho l}{d b} = R_F \frac{l}{b} \\
 \implies R_F &= R_S \frac{b}{l} = 10 \Omega \frac{0,3 \mu\text{m}}{50 \mu\text{m}} = 60 \frac{\text{m}\Omega}{\square} \\
 \implies \rho &= R_F d = 18 \cdot 10^{-9} \Omega\text{m}
 \end{aligned}$$

1.4 a) Geben Sie ein Ersatzschaltbild an, welches die Kapazität zwischen der untern Metallplatte und Substrat (Substratkapazität) und deren Verluste berücksichtigt!

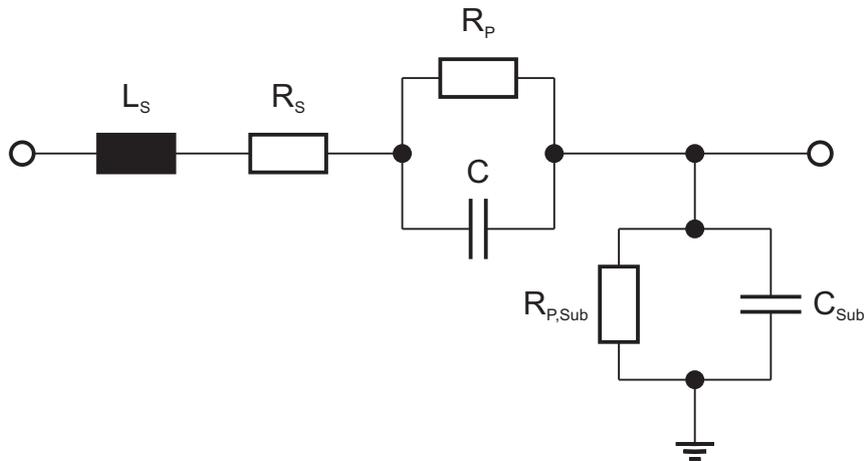


Abb. 1.3: Ersatzschaltbild unter Berücksichtigung der Substratkapazität

b) Berechnen Sie die Substratkapazität!

Betrachtung der Kapazität als Plattenkondensator zwischen unterer Metallebene und Substrat

$$C_{\text{Sub}} = \varepsilon_0 \varepsilon_{r, \text{SiO}_2} \frac{l b}{d}$$

$$\Rightarrow C_{\text{Sub}} = \varepsilon_0 \varepsilon_{r, \text{SiO}_2} \frac{10 \mu\text{m} \cdot 10 \mu\text{m}}{4 \mu\text{m}} = 863,285 \text{ aF}$$

c) Berechnen Sie das Verhältnis aus Nutzkapazität und Substratkapazität!

$$\frac{C}{C_{\text{Sub}}} = 184,36$$

Aufgabe 2: PN-Diode (CPO: 20 Punkte, DPO: 15 Punkte)

2.1 Berechnen Sie die Diffusionsspannung!

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

2.2 Bestimmen Sie den Sperrsättigungsstrom mit Hilfe der gegebenen Kennlinie!
Aus dem Diagramm kann der Wert $I_D = 42 \text{ mA}$, $U = 0,775 \text{ V}$ abgelesen werden.

$$I_D = I_S (e^{U/U_T} - 1)$$

$$I_S = \frac{I_D}{e^{U/U_T} - 1} = 4,67 \text{ fA}$$

2.3 In welchem Spannungsbereich liegt U_E , wenn der Strom $|I_E| < 100 \text{ mA}$ ist? Vernachlässigen Sie hierbei Durchbrucheffekte.

Hinweis: Verwenden Sie $I_S = 1 \text{ pA}$, falls Sie Aufgabe 2.1 nicht lösen konnten.

$$U = U_F = U_T \ln \frac{I_D}{I_S} = 0,795 \text{ V}$$

$$-U_F < U_E < 5 \text{ V} + U_F$$

$$-0,795 \text{ V} < U_E < 5,795 \text{ V}$$

2.4 Die Eingangsspannung beträgt nun $U_E = 0 \text{ V}$.

a) Berechnen Sie die Weite der Raumladungszone der Dioden D_1 und D_2 !
Bestimmen Sie das Verhältnis w_n/w_p !

$$w_1 = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{e} (U_D - U) \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)} = 480 \text{ nm}$$

$$w_2 = 178 \text{ nm}$$

$$\frac{w_n}{w_p} = 0,5$$

Ab hier Lösungen nur für CPO:

b) Berechnen Sie die Sperrschichtkapazität $C_{SP,1}$ der Diode D_1 ! Welche der beiden Dioden besitzt die größere Sperrschichtkapazität?

$$C_{SP1} = \frac{\varepsilon A}{w_1} = 22 \text{ fF}$$

Die Diode D_2 besitzt die größere Sperrschichtkapazität, da die Weite ihrer Raumladungszone geringer ist.

c) Zeichnen Sie in Abbildung 2.1 den qualitativen Verlauf des E-Feldes von Diode D_1 sowie w_n und w_p ein!

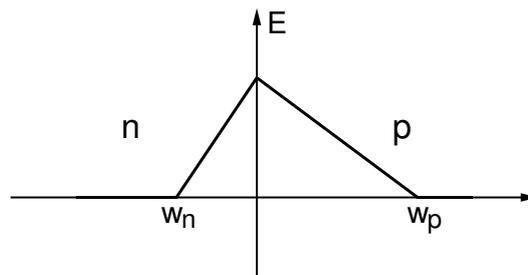


Abb. 2.1: Verlauf des E-Feldes in der Raumladungszone einer Diode

Aufgabe 3: Bipolartransistor (CPO: 20 Punkte, DPO: 15 Punkte)

- 3.1 a) Die Transitfrequenz ist die Frequenz, bei der die Stromverstärkung des Transistors gleich Eins ist: $|\beta(f_T)| = 1$.

$$\begin{array}{ll} \text{effektive Basisweite} & w_B^* = w_{B,0} - w_p = 115 \text{ nm} \\ \text{Transitfrequenz} & f_T = \frac{\omega_T}{2\pi} = \frac{2 D_{nB}}{2\pi (w_B^*)^2} = 84,2 \text{ GHz} \end{array}$$

b)

$$B_N = \frac{D_{nB} N_{DE} L_{pE}}{D_{pE} N_{AB} w_B^*} \Rightarrow N_{AB} = \frac{D_{nB} N_{DE} L_{pE}}{D_{pE} B_N w_B^*} = 1,08 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

$$\frac{N_{DC}}{N_{AB}} = 0,25 \Rightarrow N_{DC} = 2,7 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

- c) In der p-dotierten Basis sind Elektronen die Minoritäten.

$$n_{B_0} = \frac{n_i^2}{N_{AB}} = 208,7 \text{ cm}^{-3}$$

d)

$$\begin{array}{ll} \text{Elektronen-Dichte am BE-Übergang} & n_{B,1} = n_{B_0} \cdot e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} = 2,25 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3} \\ \text{Ladung in der Basis} & Q_1 = \frac{1}{2} e A w_B^* n_{B,1} = 60,2 \text{ fC} \end{array}$$

- 3.2 a) Die BC-RLZ ist kleiner: $U_{CE2} < U_{CE1}$ bei $U_{BE} = \text{konst.}$ bedeutet eine geringere BC-Sperrspannung und somit eine geringere Ausdehnung der BC-RLZ.
 b) Es handelt sich um die Rückwirkungs-Diffusionskapazität C_{DC} (zwischen Basis und Kollektor)

Ab hier Lösungen nur für CPO:

c) s. Abb. 3.1

d) Durch eine Änderung der Basis-Emitter-Spannung wird die Minoritätsträgerkonzentration am emitterseitigen Basisrand und somit die Minoritätsträgerladung in der Basis verändert. Diese Ladungsänderung bezogen auf die Spannungsänderung wird durch die BE-Diffusionskapazität beschrieben.

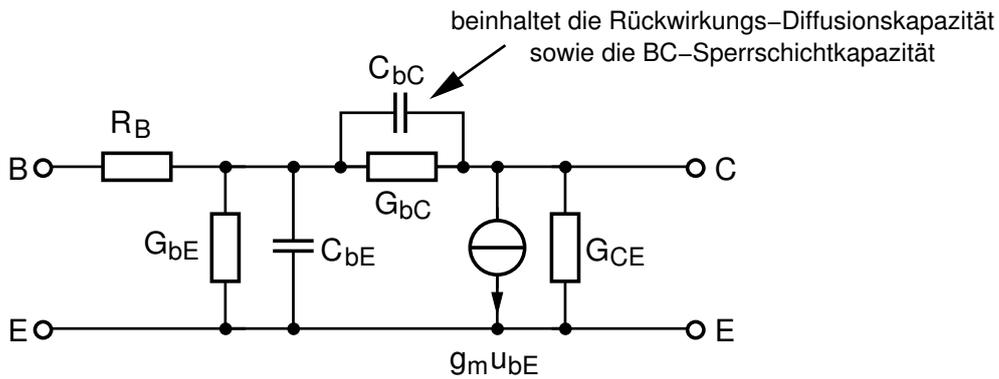


Abb. 3.1: Kleinsignal-Ersatzschaltbild des Bipolartransistors.

e)

$$I_{C,1} = e A D_{nB} \frac{n_{B_0}}{w_B^*} \left(e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1 \right) = 31,9 \text{ mA}$$

$$g_{m,1} = \frac{I_{C,1}}{U_T} = 1,225 \text{ S}$$

$$\tau_{T0} = \frac{1}{\omega_T} = 1,89 \text{ ps}$$

$$C_{DE} = \tau_{T0} \cdot g_{m,1} = 2,31 \text{ pF}$$

f)

$$Q_2 = \frac{1}{2} e A w_B^{**} n_{B,1}$$

$$\Rightarrow w_B^{**} = 116,1 \text{ nm} \quad (\text{eff. Basisweite f\u00fcr } U_{CE2})$$

$$I_{C,2} = e A D_{nB} \frac{n_{B_0}}{w_B^{**}} \left(e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1 \right) = 31,5 \text{ mA}$$

$$\Delta I_C = I_{C,1} - I_{C,2} \approx 0,4 \text{ mA}$$

g)

$$G_{CE} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}} \approx \frac{0,4 \text{ mA}}{400 \text{ mV}} = 1 \text{ mS}$$

Aufgabe 4: MOSFET (20 Punkte)

Die Aufgabenpunkte sind unabhängig voneinander lösbar. Bei Multiple-Choice Aufgabenpunkten können mehrere Antworten richtig sein. Falsche Kreuze führen zu Punktabzug.

4.1 Gegeben ist ein in Silizium-Technologie hergestellter, integrierter p-Kanal MOSFET.

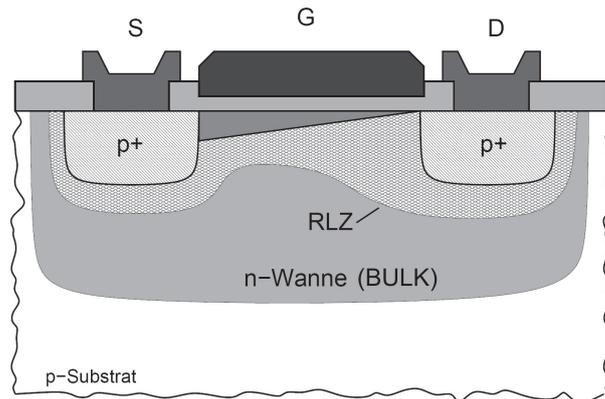


Abb. 4.1: p-Substrat / Querschnitt eines p-Kanal MOSFET

- a) Siehe Abb. 4.1.
 b) Siehe Abb. 4.1.
 c) Welche Ladungsträger sind in diesem Bauelement für den Stromtransport verantwortlich?
 Elektronen. Löcher. Beides.
 d) Siehe Abb. 4.1.

4.2 Bei einem MOSFET wird die in Abb. 4.2 dargestellte Steuerkennlinie bei einer Drain-Source-Spannung von $U_{DS} = -1V$ gemessen. Die Kanallängenmodulation sei in diesem Aufgabenpunkt zu vernachlässigen.

- a) Siehe Abb. 4.2.
 b) Um welchen Typ MOSFET handelt es sich?
 N-Kanal. P-Kanal. Selbstsperrend. Selbstleitend.

c) $U_{th} = -500 \text{ mV}$, $I_D = -k/2 \cdot (U_{GS} - U_{th})^2 \Leftrightarrow k = \frac{2I_D}{-(1,5 \text{ V} + 0,5 \text{ V})^2} \Leftrightarrow k = 30 \text{ mA/V}^2$

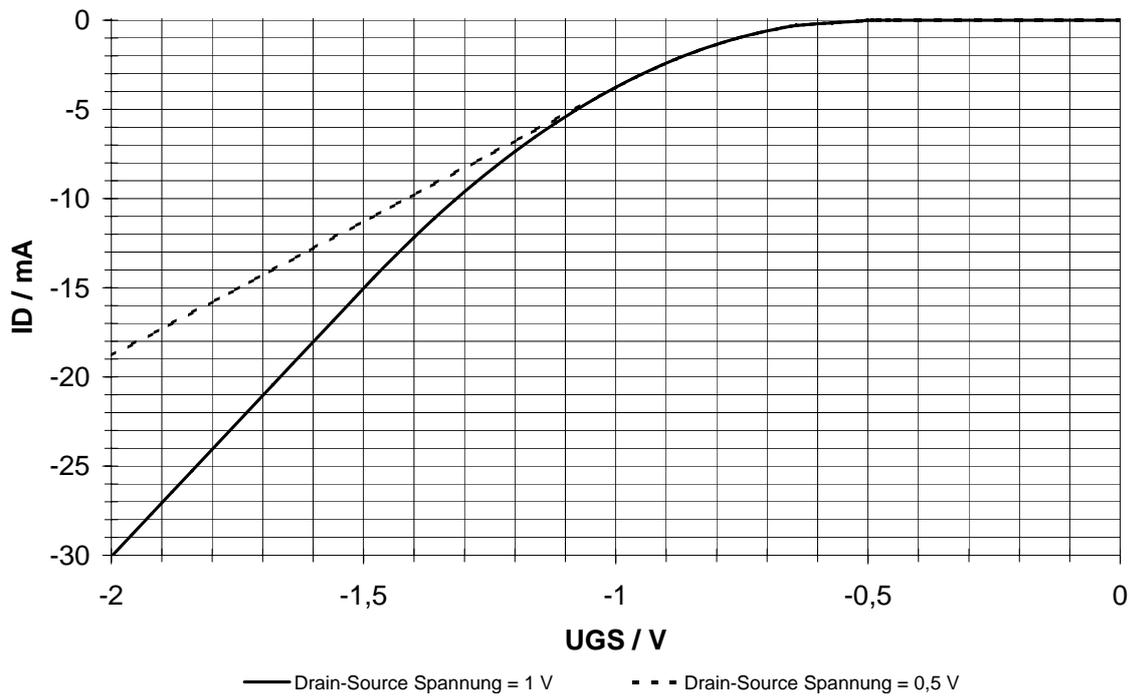


Abb. 4.2: Steuerkennlinie

d) Siehe Tabelle:

Bezeichnung des Punktes	I_D	U_{GS}
Schwellspannung	0 A	-0,5 V
Abschnürpunkt	3,75 mA	-1 V
Zusätzliche Stützstelle	18,75 mA	-2 V

e) Siehe Abb. 4.2.

4.3 Ab hier Lösungen nur für CPO:

a)

- Sourceschaltung. Emitterfolger. Drainschaltung.
 Gateschaltung. Bulkschaltung. Operationsverstärker.

b) Siehe Abb. 4.3.

c) Steilheit g_m

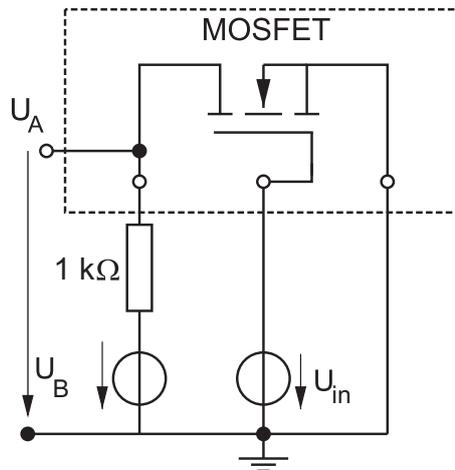


Abb. 4.3: Schaltbild

d)

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

e)

- Sourceschaltung.
 Emitterfolger.
 Drainschaltung.
 Gateschaltung.
 Bulkschaltung.
 Operationsverstärker.

f) Bulk des n-Kanal-MOSFET muss wieder an niedrigstes Potential angeschlossen werden, damit sichergestellt ist, dass die parasitäre Source-Bulk-Diode immer sperrt.