

Fachhochschule Regensburg

Fachbereich Elektrotechnik / Mikroelektronik

Prüfungsfach: **Schaltungstechnik (SC), Wintersemester 2001/2002**

Prüfungstermin: 04. Februar 2002 Studiengruppen: E5D, E5N

Prüfungsdauer: 90 Minuten (planmäßig: 10.45 – 12.15 Uhr)

Zugelassene Hilfsmittel: Formelsammlung

Aufgabensteller: Prof. Dr. Martin Schubert

Prüfungsteilnehmer/in: (Bitte leserlich in Druckbuchstaben) Sem.: _____

Name: Martin SCHUBERT

Vorname: MUSTERLÖSUNG MatNr: _____

>>>>> Alle Aufgabenblätter sind als Bestandteil der Lösung mit abzugeben ! <<<<<

Alle zusätzlichen Blätter können nur dann gewertet werden, wenn Sie durch Angabe des Namens, des Datums und der bearbeiteten Aufgabe **eindeutig zuzuordnen** sind !

Maximal erreichbare Punktzahl: 100 Punkte.

Runden Sie Zahlenwerte typischerweise auf drei geltende Ziffern oder auf so viele Ziffern, wie offensichtlich notwendig sind (z.B. $x=0,9997$, wenn das Ergebnis $x<1$ sein muss).

>>>>> Rot ist Korrekturfarbe, bitte keinen Rotstift verwenden ! <<<<<

Weitere Hinweise:

1. Konkreten Zahlenwerten ist immer ein Ausdruck voranzusetzen, der die Herkunft der Zahl belegt.
2. Bei „Zeigen Sie, dass...“ oder „Leiten Sie ... her“ wird ein nachvollziehbarer Lösungsweg erwartet.
3. Die Aufgaben sind so aufgebaut, dass Folgefehler nach Möglichkeit vermieden werden. Nach „Zeigen Sie, dass...“ z.B. kann man auch dann weitermachen, wenn der Beweis nicht gelingt.
4. Kalkuliert wurde ein Zeitbedarf von ca. einem Punkt pro Minute. Verwenden Sie nicht zu viel Zeit für Aufgaben, die nur wenige Punkte bringen.
5. Zur Korrektur: "FF" steht für Folgefehler, wenn trotz falscher Ergebnisse Punkte gegeben werden.

Punkte:	Note:	Datum:	Prüfer: Prof. Dr. M. Schubert
---------	-------	--------	-------------------------------

1 Verstärkung und Bandbreite

($\Sigma=30P$)

1.1 Das Grundprinzip der Verstärkung

($\Sigma=5P$)

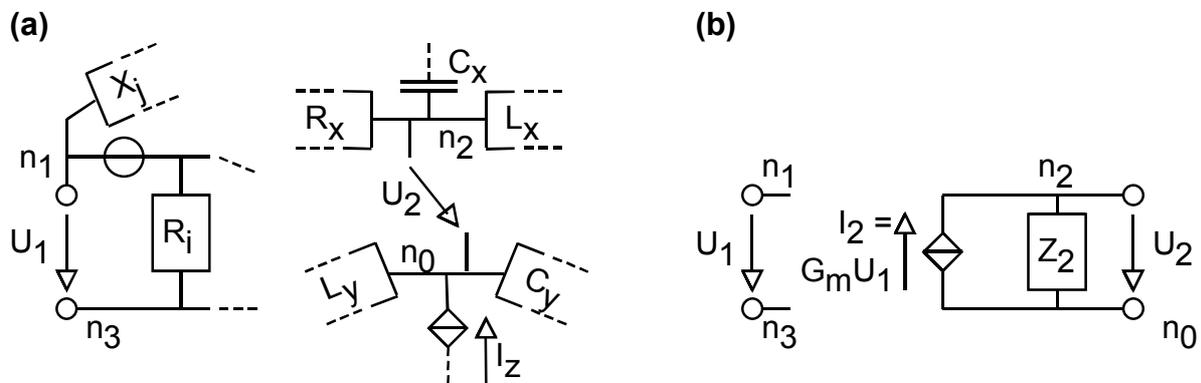


Abbildung 1.1: (a) Beliebiges Netzwerk mit $U_2=f(U_1)$, (b) reduziertes Netzwerk

Abb. 1.1(a) zeigt ein beliebiges Netzwerk mit $U_2=f(U_1)$. Nach einigen Umformungen sei es gelungen, das Netzwerk auf die im Bildteil (b) gezeigten Komponenten zu reduzieren. Mit diesem reduzierten Netzwerk ist die Spannungsverstärkung $A_V=U_2/U_1$ zu ermitteln.

Kreuzen Sie alle richtigen Aussagen an:

Im reduzierten Netzwerk ...

(2P)

- (a) dürfen zwischen den Knoten n_1 und n_3 keine weiteren Schaltungsteile liegen.
- (b) darf zwischen den Knoten n_1 und n_3 eine beliebige Schaltung liegen, entscheidend ist die Spannung U_1 zwischen den Knoten n_1 und n_3 .**
- (c) ist die Impedanz Z_2 prinzipiell die Impedanz zwischen dem Knoten n_2 und Masse.
- (d) ist Z_2 die Impedanz zwischen den Knoten, zwischen denen U_2 gemessen wird.**
- (e) liegt die Stromquelle i_2 prinzipiell zwischen dem Knoten n_2 und Masse.
- (f) Liegt die Stromquelle i_2 zwischen den Knoten, zwischen denen U_2 gemessen wird.**
- (g) ist Z_2 die Ausgangsimpedanz des verstärkenden Netzwerkes, Koppelkondensatoren und die Eingangsimpedanz der folgenden Stufe sind dabei nicht berücksichtigt.
- (h) enthält Z_2 sämtliche Einflüsse auf die Impedanz zwischen den Knoten n_2 und n_0 , z.B. auch Koppelkondensatoren und die Eingangsimpedanz der folgenden Stufe.**

Berechnen Sie die Ausgangsspannung U_2 als Funktion von G_m , Z_2 und U_1 .

(Rechenweg muss erkennbar sein.)

(2P)

$$U_2 = I_2 Z_2 = [G_m \cdot U_1] Z_2 = (G_m \cdot Z_2) U_1$$

Berechnen Sie die Spannungsverstärkung $A_V=U_2/U_1$ (Rechenweg muss erkennbar sein).

(1P)

$$A_V = \frac{U_2}{U_1} = \frac{g_m Z_2 U_1}{U_1} = G_m Z_2$$

1.2 Verstärkung eines 4-Pols

(Σ=10P)

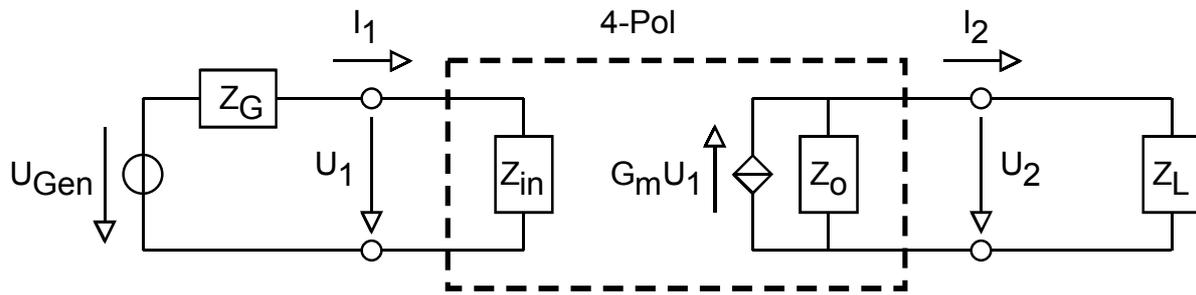


Abbildung 1.2: Beliebiges 4-Pol-Netzwerk

Abb. 1.2 zeigt einen beliebigen 4-Pol-Netzwerk, gespeist von einem Generator mit Innenwiderstand Z_G und belastet mit einer Lastimpedanz Z_L . Setzen Sie die definierenden Formeln ein:

Spannungsverstärkung: $\dots\dots A_V = \frac{U_2}{U_1} \dots\dots$ (Gl. 1) (1P)

Stromverstärkung: $\dots\dots A_I = \frac{I_2}{I_1} \dots\dots$ (Gl. 2) (1P)

Eingangsimpedanz: $\dots\dots Z_{in} = \frac{U_1}{I_1} \dots\dots$ (Gl. 3) (1P)

Ausgangsimpedanz: Z_o

Lastimpedanz: $\dots\dots Z_L = \frac{U_2}{I_2} \dots\dots$ (Gl. 4) (1P)

Berechnen Sie mit Hilfe der obigen Gleichungen die Stromverstärkung als Funktion der Spannungsverstärkung. (Rechenweg muss nachvollziehbar sein.) (3P)

$$A_I = \frac{I_2}{I_1} = \frac{U_2 / Z_L}{U_1 / Z_{in}} = \frac{U_2}{U_1} \frac{Z_{in}}{Z_L} = A_V \frac{Z_{in}}{Z_L}$$

Was ist die Leistungsverstärkung A_P des Systems als Funktion von A_V , Z_{in} und Z_L ? (Die Stromverstärkung A_I ist zu eliminieren.) (2P)

$$A_P = A_V A_I = A_V \frac{Z_{in}}{Z_L} A_V = A_V^2 \frac{Z_{in}}{Z_L}$$

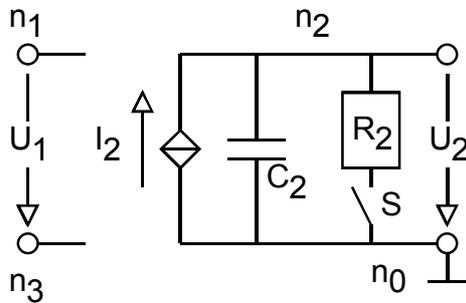
Unter welcher Randbedingung muss A_V gemessen werden, damit obige Rechnung gilt? (1P)

Mit der aktuellen Lastimpedanz Z_L , da $A_V, A_I, A_P = f(Z_L)$.

1.3 Das Verstärkungs-Bandbreite-Produkt

(Σ=15P)

(a)



(b)

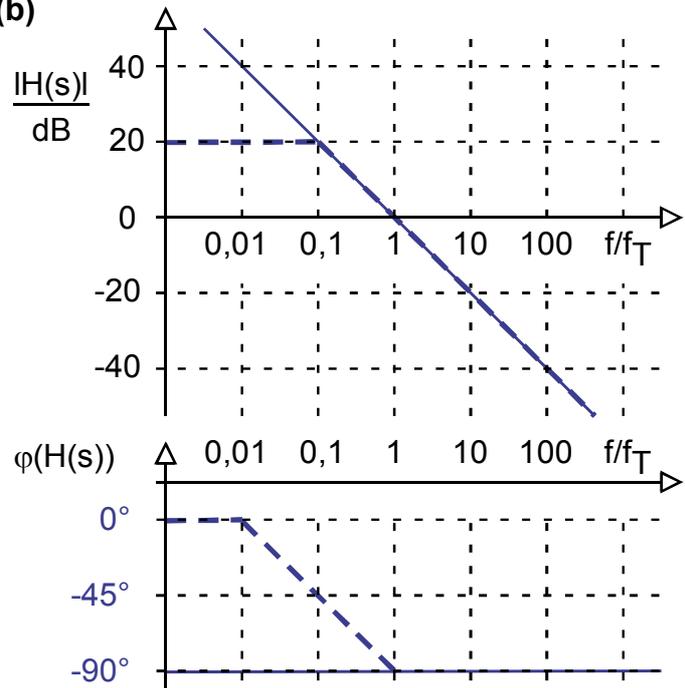


Abbildung 1.3: (a) Verstärker-Netzwerk, (b) Übertragungsfunktion

Gegeben ist das Verstärkernetzwerk in Abb. 1.3(a). Es ist $I_2 = G_m U_1$ mit konstantem $G_m > 0$.

Berechnen Sie die Übertragungsfunktion $H(s) = U_2(s) / U_1(s)$ für offenen (nicht leitenden) Schalter S. (1P)

$$H(s) = G_m Z_2 = G_m / sC_2.$$

Berechnen Sie die Übertragungsfunktion $H(jf)$ mit $s = j2\pi f$ für offenen Schalter S. (1P)

$$H(jf) = G_m Z_2 = G_m / j2\pi f \cdot C_2.$$

Wenn wir mit konstantem f_T schreiben $|H(jf)| = f_T \cdot f^{-n}$, dann ist $n = \dots - 1 \dots$ (1P)

Tragen Sie mit durchgezogenen Linien Amplituden- und Phasengang von $H(jf)$ in das Bode-Diagramm in Abb. 1.3(b) ein und beschriften Sie die Ordinate des Phasenganges. (2P)

Welche Steilheit hat der Amplitudengang von $H(jf)$ im Bode-Diagramm? -20dB/dec (1P)

Welche Regel gilt auf dieser Kennlinie in Bezug auf Verstärkung und Bandbreite? (1P)

Das Produkt von Verstärkung und Bandbreite ist konstant

Wie groß ist das Verstärkungs-Bandbreite-Produkt GB mit $G=|H(jf)|$ und $f=B$? Drücken Sie GB als Funktion von G_m und C aus. (1P)

$$GB = \left| \frac{G_m}{j2\pi BC_2} \right| \cdot B = \frac{G_m}{2\pi C_2}$$

In welchem Zusammenhang steht das GB mit der Transitfrequenz f_T ? (1P)

$GB = f_T$ (vorausgesetzt, die Steigung in $f=f_T$ nicht schon -40dB/dec ist)

Abb. 1.4 zeigt die Eingangsspannung $U_1 = 2,5\text{V} \cdot \cos(2\pi f_1 t)$ zu dem Netzwerk in Abb. 1.3 und für $t \leq t_1$ die zugehörige Ausgangsspannung U_2 im eingeschwungenen Zustand. Wie groß ist das Verhältnis f_1/f_T für $t \leq t_1$? Begründen Sie kurz Ihre Antwort. (1P)

$f_1 / f_T = 1/2$ für $t \leq t_1$ weil $|H(jf)| = 2$

Skizzieren Sie in Abb. 1.4 $U_2(t)$ für $t \geq t_2$. Nehmen Sie eingeschwungenen Zustand an. (2P)

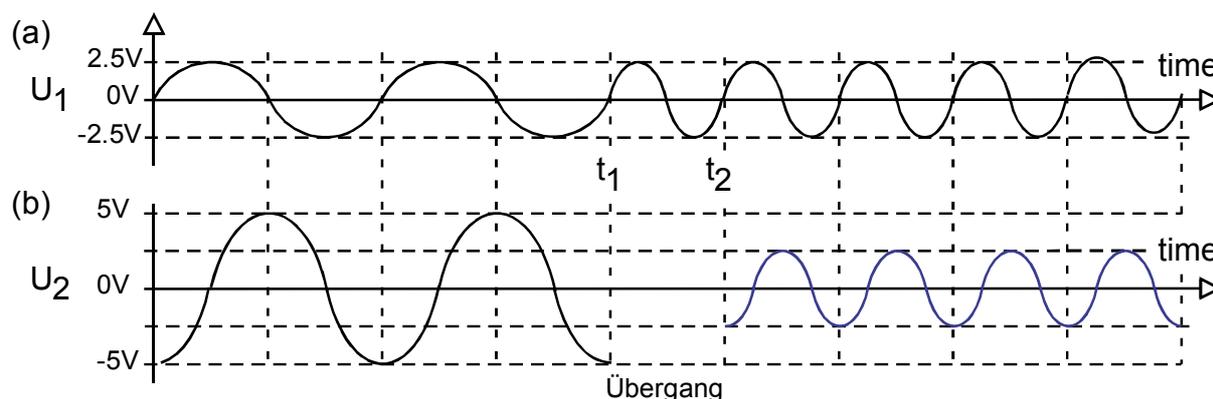


Abbildung 1.4: Veranschaulichung des Verstärkungs-Bandbreite-Produkts im Zeitbereich: (a) Eingangsspannung und (b) Ausgangsspannung des Netzwerkes in Abb. 1.3.

Der Schalter S in Abb. 1.3(a) wird nun geschlossen (Innenwiderstand 0Ω). Zeichnen sie die veränderte Übertragungsfunktion (Asymptoten) für $G_m R_2 = 10$ in Abb. 1.3(b) gestrichelt ein. (2P)

In welchem Frequenzbereich gilt nach Zuschalten von R_2 das Verstärkungs-Bandbreite-Produkt? (1P)

Auf der $1/f$ -Kurve, im Bode-Diagramm also auf Geraden mit einer Steigung von -20dB/dec . Dies ist für $f > f_p = 0,1 f_T$ der Fall.

2 Der Feldeffekt-Transistor

(Σ=20P)

2.1 Eingangs-Charakteristiken

(Σ=10P)

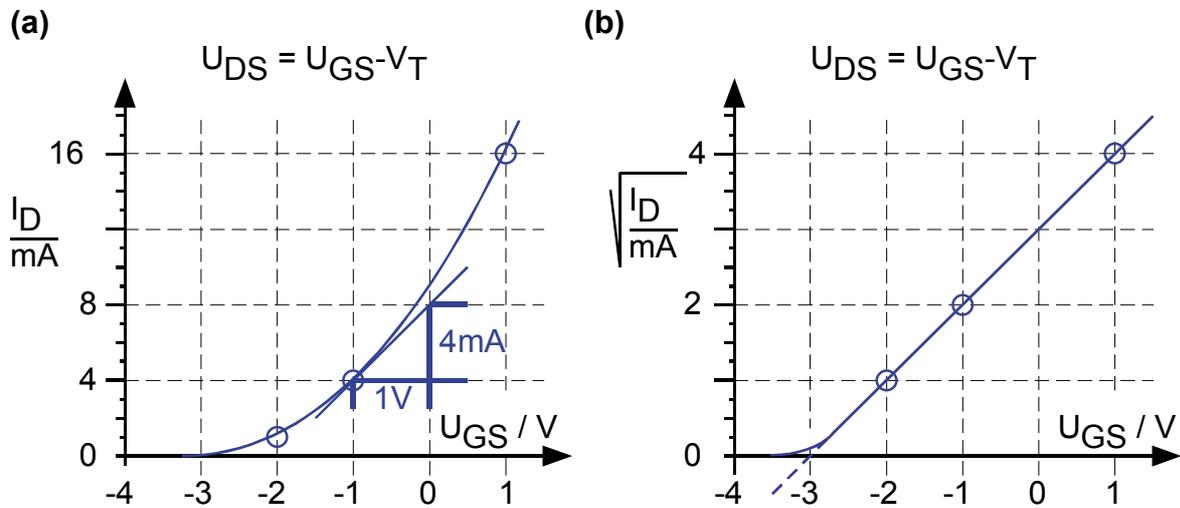


Abbildung 2.1: Eingangskennlinie eines FETs mit (a) I_D und (b) $\sqrt{I_D}$ über U_{GS} .

Ein FET liefert folgende Messdaten:

$U_{GS} / V:$	-2	-1	1
$I_D / mA:$	1	4	16

Tragen Sie diese Daten in die Diagramme in Abb. 2.1 (a) und (b) ein. (2P)

Zeichnen Sie die zugehörigen Kennlinien, die durch die Messpunkte verlaufen müssen. (1P)

Welche Schwellenspannung V_T hat der FET und wo lesen Sie diese ab? (1P)

$V_T = -3V$, denn Bildteil (b) liefert $I_D=0mA$ bei $U_{GS}=-3V$

Wie groß ist I_{DSS} ? Woher nehmen Sie diese Information? (1P)

Ablesen in Bildteil (b): $I_{DSS}=I_D(U_{GS}=0V) = 3^2mA = 9mA$

Handelt es sich um einen JFET (Sperrschicht-FET) oder um einen MOSFET? Grund? (1P)

MOSFET, weil $U_{GS}=1V$ bei einem JFET nicht vernünftig möglich ist

Der Übertragungsleitwert ist als Differenzenquotient (Ableitung) definiert: $g_m = \frac{dI_D}{dU_{GS}}$ (1P)

Ermitteln Sie damit graphisch aus Abb. 2.1(a): $g_m(U_{GS}=-1V) \cong 4mA/1V = 4 mA/V$ (1P)

Kontrollrechnung: $g_m(I_D, V_T, I_{DSS}) = \frac{2}{|V_T|} \sqrt{I_D I_{DSS}} = \frac{2}{|-3V|} \sqrt{4mA \cdot 9mA} = 4 mA/V$ (2P)

2.2 Ausgangs-Charakteristiken

(Σ=10P)

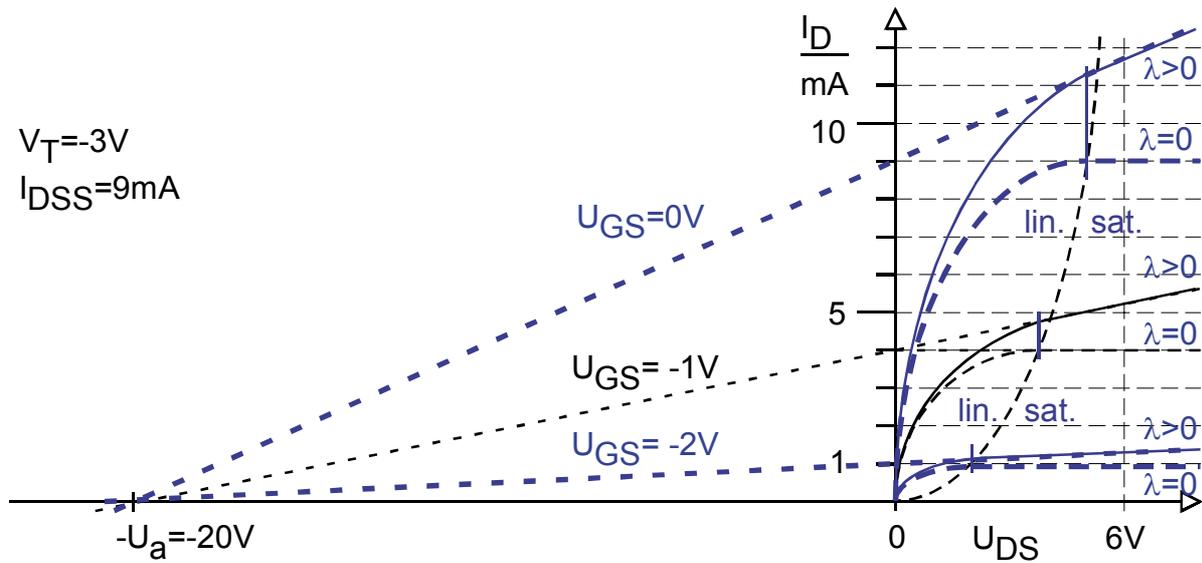


Abbildung 2.2: Ausgangskennlinienfeld eines n-Kanal-FETs mit $V_T = -3V$ und $I_{DSS} = 9mA$.

Kennzeichnen Sie in Abb. 2.2 die $I_D(U_{DS})$ -Kennlinien zutreffend mit $\lambda=0$ und $\lambda>0$. (1P)

Welchen Wert hat λ in Abb. 2.2 wenn $\lambda>0$? (Bedenke: Wo wird $I_D = I_{D0} (1 + \lambda U_{DS}) = 0$?) (1P)

$\lambda = 1/U_a = 1/20V = 0,05V^{-1}$.

Zeichnen Sie in Abb. 2.2 die Kennlinien $I_D(U_{GS})$ für $U_{GS} = -2V$ (mit $\lambda=0$ und $\lambda>0$) und $U_{GS} = 0V$ (ebenfalls für $\lambda=0$ und $\lambda>0$) ein. (2P)

Kennzeichnen Sie bei allen sechs $I_D(U_{GS})$ -Kennlinien mit einem kurzen vertikalen Strich die Grenze zwischen linearem Bereich und Sättigung. Machen Sie kenntlich, wo welcher Bereich ist (z.B. mit „lin.“ und „sat.“). (1P)

Der Ausgangsleitwert ist als Differenzenquotient (Ableitung) definiert: $g_{DS} = \frac{dI_D}{dU_{DS}}$ (1P)

Ermitteln Sie damit graphisch: $g_{DS}(U_{GS} = -1V, U_{DS} = 6V) \cong 5,2mA/26V = 0,2mA/V = (5K\Omega)^{-1}$ (2P)

Kontrollrechnung: $g_{DS}(I_D, \lambda) \cong \lambda I_D = 0,05V^{-1} \cdot 5,2 mA = 0,26 mA/V = (3,8K\Omega)^{-1}$ (2P)

3 Differenzieller Verstärker

(Σ=10P)

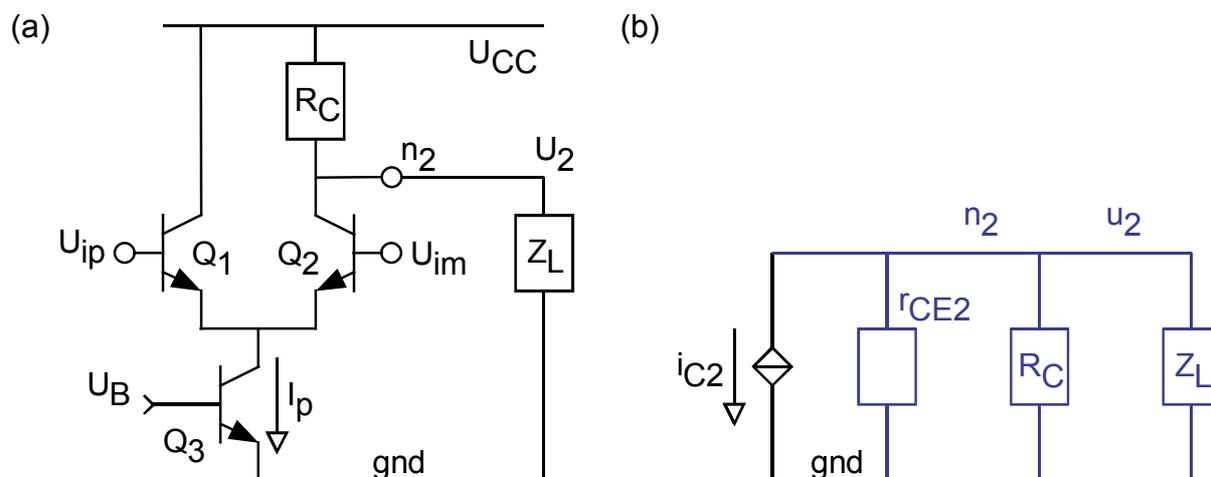


Abbildung 3: (a) Differenzieller Verstärker, (b) Kleinsignal-ESB für den Ausgangsknoten.

Komplettieren Sie das Kleinsignal-Ersatzschaltbild in Abb. 3(b) für den Knoten n_2 . (2P)

Welchen Strom bezeichnet i_{C2} in Abb. 3(b)? (1P)

Den Kleinsignal-Kollektorstrom des Transistors Q_2 .

Der Übertragungsleitwert von Q_1 und Q_2 sei g_m . Wie berechnet sich g_m als Funktion von I_p ? Der Gedankengang oder Rechenweg muss nachvollziehbar sein. (2P)

$g_m = \frac{1}{2} I_p / u_T$ mit $u_T = kT/q$, der Faktor $\frac{1}{2}$ kommt durch die Aufteilung des Stromes auf Q_1 und Q_2 .

Wie berechnet sich i_{C2} als Funktion von $u_{diff} = u_{ip} - u_{im}$? Der Gedankengang oder Rechenweg muss nachvollziehbar sein. (2P)

$$i_{C2} = g_m u_{im} = \frac{1}{2} g_m u_{diff}$$

Wie berechnet sich u_2 als Funktion von u_{diff} und Z_2 , wobei $Z_2 = (r_{CE2} \parallel R_C \parallel Z_L)$? (1P)

$$u_2 = i_{C2} Z_2 = \frac{1}{2} g_m u_{diff} Z_2$$

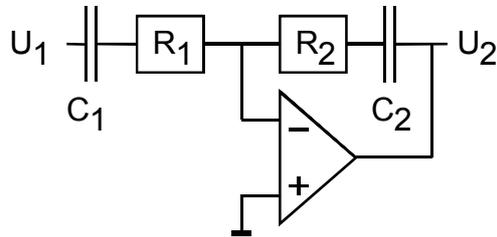
Wie groß ist die Verstärkung $A_V = u_2 / u_{diff}$? (2P)

$$A_V = \frac{u_2}{u_{diff}} = \frac{0,5 g_m u_{diff} Z_2}{u_{diff}} = 0,5 g_m Z_2$$

4 Arbeiten mit Operationsverstärkern

(Σ=10P)

(a)



(b)

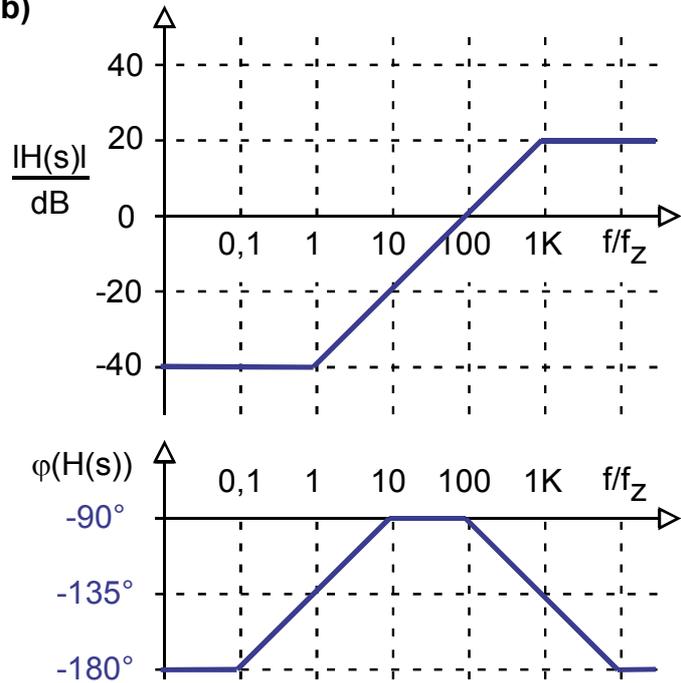


Abbildung 4: (a) Beschalteter, idealer Operationsverstärker, (b) Bode-Diagramm.

Berechnen Sie die Übertragungsfunktion $H(s)$ der in Abb. 4(a) dargestellten Schaltung als Funktion von R_1, C_1, R_2, C_2 . (3P)

$$Z_k(s) = \frac{1}{sC_k} + R_k = \frac{1 + sR_k C_k}{sC_k} \quad \text{für } k = 1, 2, \quad H(s) = -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{C_1}{C_2} \cdot \frac{1 + sR_2 C_2}{1 + sR_1 C_1}$$

Für die Eingangsimpedanz kann garantiert werden: $|Z_{in}| \geq |Z_{in,min}| = \dots R_1 \dots$ (1P)

Berechnen Sie die Polstelle f_p und die Nullstelle f_z als Funktionen von R_1, C_1, R_2, C_2 . (1P)

$$f_p = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}, \quad f_z = \frac{1}{2\pi R_2 C_2}$$

Es ist $R_2=10R_1, C_2=100C_1$. Wogegen (Formel und Wert) strebt $H(jf)$ für $f \rightarrow 0$ und $f \rightarrow \infty$? (2P)

$$H(jf \rightarrow 0) \rightarrow -C_1/C_2 = 0,01 \quad \text{und} \quad H(jf \rightarrow j\infty) \rightarrow -R_2/R_1 = -10$$

Zeichnen Sie den Amplitudengang von $H(jf)$ in Abb. 4(b) ein. (1P)

Beschriften Sie die Ordinate für $\varphi\{H(jf)\}$ in Abb. 4(b) passend. (1P)

Zeichnen Sie den Phasengang von $H(jf)$ in Abb. 4(b) ein. (1P)