

Laufende Nummer

Fachhochschule Regensburg	
Fachbereich Elektrotechnik / Mikroelektronik	
Prüfungsfach:	Schaltungstechnik (SC)
Prüfungstermin:	03.02.1997, WS 1996 / 97
Prüfungsdauer:	90 Minuten (planmäßig: 08.15 - 09.45 Uhr)
Zugelassene Hilfsmittel:	Formelsammlung
Aufgabensteller:	Prof. Dr. M. Schubert
Prüfungsteilnehmer/in:	(Bitte leserlich in Druckbuchstaben) Sem.: _____
Name:	_____ M U S T E R L Ö S U N G _____.
Vorname:	_____ M a r t i n S c h u b e r t _____.

>>>>> **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: 114 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:

Die Aufgaben sind so aufgebaut, daß Folgefehler nach Möglichkeit vermieden werden. Eine Aufgabe muß nicht in jedem Fall aufgegeben werden, wenn der Faden einmal abreißt.

Kalkuliert wurde ein Zeitbedarf von ca. einem Punkt pro Minute. Verwenden Sie nicht zu viel Zeit für Aufgaben, die nur wenige Punkte bringen.

1 Großsignalverhalten eines Verstärkers (Σ 48P)

1.1 Bestimmung der Slew-Rate (SR) (Σ 29P)

Gegeben sei das Blockschaltbild eines Verstärkers gemäß Abb. 1.1. Um die vorliegende Problematik studieren zu können, wurden zum Bau des Verstärkers zwei Teilschaltungen als OP₂ und OP₃ zusammengefaßt. Vereinfachend nehmen wir an, daß OP₂ und OP₃ ideale Operationsverstärker seien.

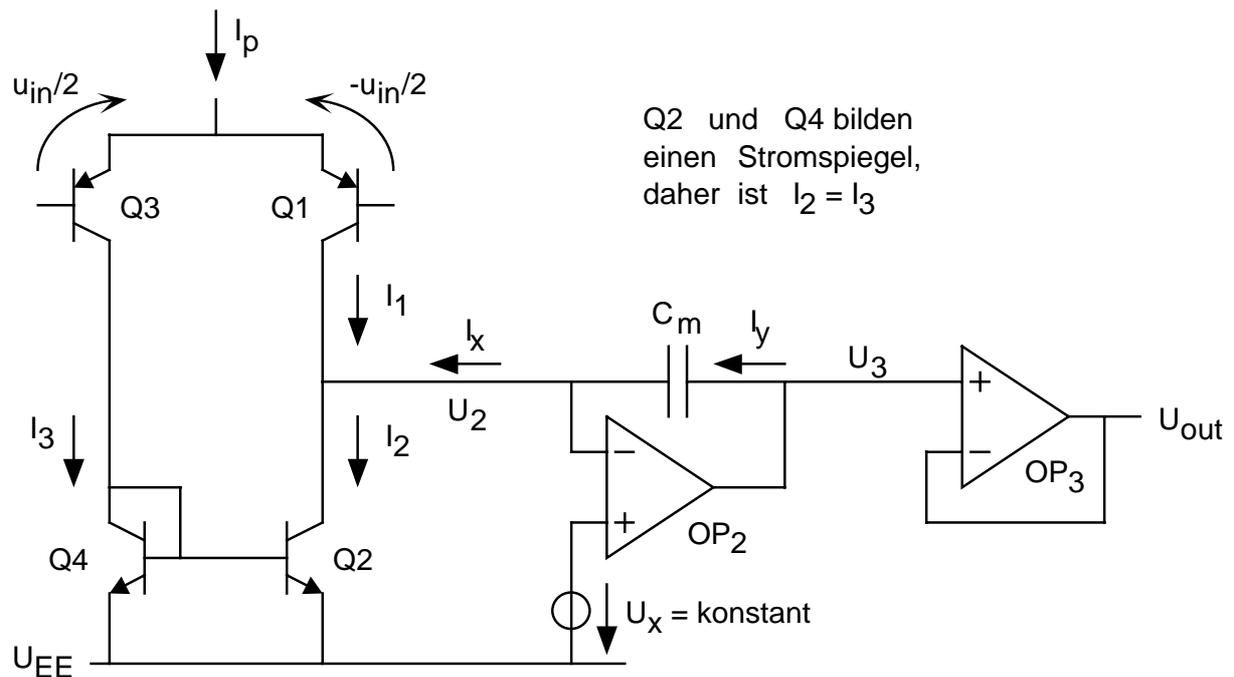


Abb. 1.1: Blockschaltbild eines Verstärkers, zwei Teilschaltungen wurden als OP₂ und OP₃ zusammengefaßt.

Welche Bauelemente in Abb. 1.1 bilden die Eingangsstufe ? (2P)

Q₁, Q₂, Q₃, Q₄

Welche Bauelemente in Abb. 1.1 bilden die Zwischenverstärkerstufe ? (2P)

OP₂, U_x, C_m

Welche Bauelemente in Abb. 1.1 bilden die Endstufe ? (1P)

OP₃

Betrachten Sie die Eingangsstufe in Abb. 1.1. Wie groß ist $I_{3,\max} = \max\{I_3\}$, also der maximal mögliche Wert des Stromes I_3 , als Funktion des Polarisierungsstromes I_p ? (1P)

$$I_{3,\max} = I_p$$

Wenn $I_3 = I_{3,\max}$, wie groß sind dann die Ströme $I_1 = I_{1,\min}$, $I_2 = I_{2,\max}$ und $I_x = I_{x,\max}$ als Funktion von I_p ? (3P)

$$I_1 = I_{1,\min} = 0$$

$$I_2 = I_{2,\max} = I_3 = I_p$$

$$I_x = I_{x,\max} = I_{2,\max} - I_{1,\min} = I_p$$

Wie groß ist $I_{1,\max} = \max\{I_1\}$, also der maximal mögliche Wert des Stromes I_1 , als Funktion des Polarisierungsstromes I_p ? (1P)

$$I_{1,\max} = I_p$$

Wenn $I_1 = I_{1,\max}$, wie groß sind dann die Ströme $I_3 = I_{3,\min}$, $I_2 = I_{2,\min}$ und $I_x = I_{x,\min}$, als Funktion von I_p ? (3P)

$$I_3 = I_{3,\min} = 0$$

$$I_2 = I_{2,\min} = 0$$

$$I_x = I_{x,\min} = I_{2,\min} - I_{1,\max} = -I_p$$

Zeigen Sie durch Verwendung der oben erzielten Ergebnisse, daß der mögliche Wertebereich des Stromes I_x gegeben ist durch $-I_p \leq I_x \leq I_p$. (2P)

$$\begin{array}{l} I_{x,\min} = -I_p \\ I_{x,\max} = +I_p \end{array} \quad \left. \begin{array}{l} \backslash \\ / \end{array} \right\} -I_p \leq I_x \leq I_p$$

Begründen Sie, warum U_2 konstant ist und auf welchem Potential liegt U_2 ? (2P)

$$U_2 = U_x$$

wegen virtuellem Kurzschluß zwischen den Eingängen von OP_2

Begründen Sie: Warum ist $I_x = I_y$? (1P)

$I_x = I_y$ da $Z_{in} \rightarrow \infty$ beim idealen OP und
da die Summe aller Ströme gleich Null sein muß.

Durch die Kapazität C_m fließt der Strom I_x . Berechnen Sie dU_3/dt als Funktion von C_m und I_x . (2P)

$$I_x = C_m \frac{dU_3}{dt}, \text{ daher:}$$

$$\frac{dU_3}{dt} = \frac{I_x}{C_m}$$

Welche Abhängigkeit besteht zwischen den Spannungen U_3 und U_{out} (Formel) ? (1P)

$$U_{out} = U_3$$

Es sei $I_{x,min} \leq I_x \leq I_{x,max}$. Wie groß ist damit $SR_{pos} = \max\{dU_{out}/dt\}$, also die maximale Änderungsgeschwindigkeit der Ausgangsspannung U_{out} in ansteigender Richtung ? (2P)

$$SR_{pos} = \max \frac{dU_{out}}{dt} = \max \left\{ \frac{I_x}{C_m} \right\} = \frac{I_{x,max}}{C_m}$$

Es sei $I_{x,min} \leq I_x \leq I_{x,max}$. Wie groß ist damit $SR_{neg} = \min\{dU_{out}/dt\}$, also die maximale Änderungsgeschwindigkeit der Ausgangsspannung U_{out} in abfallender Richtung ? (2P)

$$SR_{neg} = \min \frac{dU_{out}}{dt} = \min \left\{ \frac{I_x}{C_m} \right\} = \frac{I_{x,min}}{C_m}$$

Wie groß ist die Slew-Rate SR als Funktion von I_p und C_m wenn $|I_{x,min}| = |I_{x,max}| = I_p$ ist ? Es ist $SR = \min\{|SR_{pos}|, |SR_{neg}|\}$. (2P)

$$SR = |SR_{pos}| = |SR_{neg}| = \frac{I_p}{C_m}$$

Es läßt sich zeigen, daß $SR = 2u_T \omega_T$. Berechnen Sie die Millerkapazität C_m bei $u_T = 25 \text{ mV}$, $I_p = 1 \text{ mA}$ und einer Transitfrequenz von $f_T = 10 \text{ MHz}$ (Formel und Wert). (2P)

$$\frac{I_p}{C_m} = SR = 2u_T \omega_T \Rightarrow C_m = \frac{I_p}{2u_T \omega_T} = \frac{1 \text{ mA}}{2 \cdot 25 \text{ mV} \cdot 2\pi \cdot 10^7 \text{ Hz}} = 318 \text{ pF}$$

1.2 Auflösung der Zwischenverstärkerstufe

(Σ 6P)

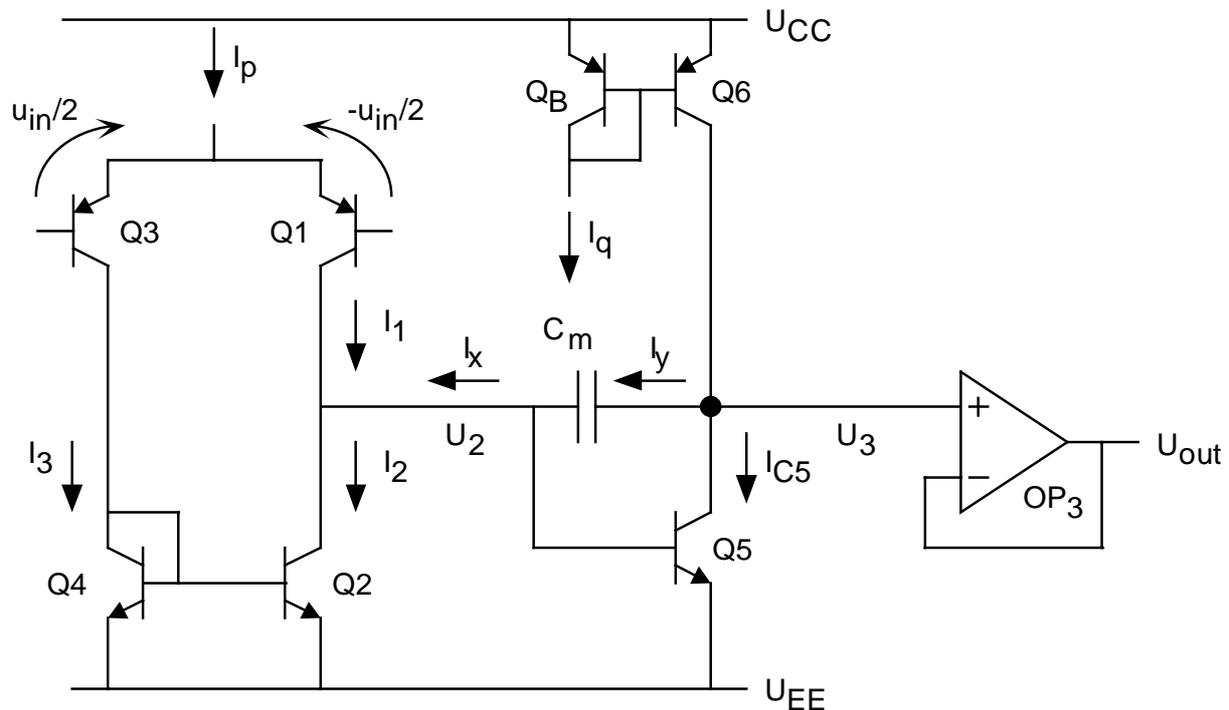


Abb. 1.2: Zwischenverstärkerstufe der Abbildung 1.1 in einzelne Komponenten aufgelöst.

In Abb. 1.2 wird die Schaltung aus Abb. 1.1 detaillierter dargestellt. Benennen Sie die Bauelemente, die OP₂ aus Abb. 1.1 ersetzen. (Q_B als Teil des „Biasing circuit“ gehört nicht dazu.) **(2P)**

Q5, Q6

Wie groß ist der Ruhestrom I_{Ca5} des Kollektors von Q5 als Funktion von I_q ? **(1P)**

$$I_{Ca5} = I_{Ca6} = I_q$$

Bedenken Sie, daß der Strom I_x, der die Kapazität C_m von links her lädt, begrenzt ist durch $-I_p \leq I_x \leq I_p$. Wie groß muß der Ruhestrom I_{Ca5} mindestens eingestellt werden, damit der Strom I_x in Form von I_y auf der rechten Seite von C_m eingespeist werden kann ? **(2P)**

$$I_{Ca5} \geq I_p$$

Was ist bei der Einstellung des Stroms I_q im Vergleich zu I_p daher zu berücksichtigen ? **(1P)**

$$I_q \geq I_p$$

1.3 Gesamtschaltung mit Endstufe

(Σ 13P)

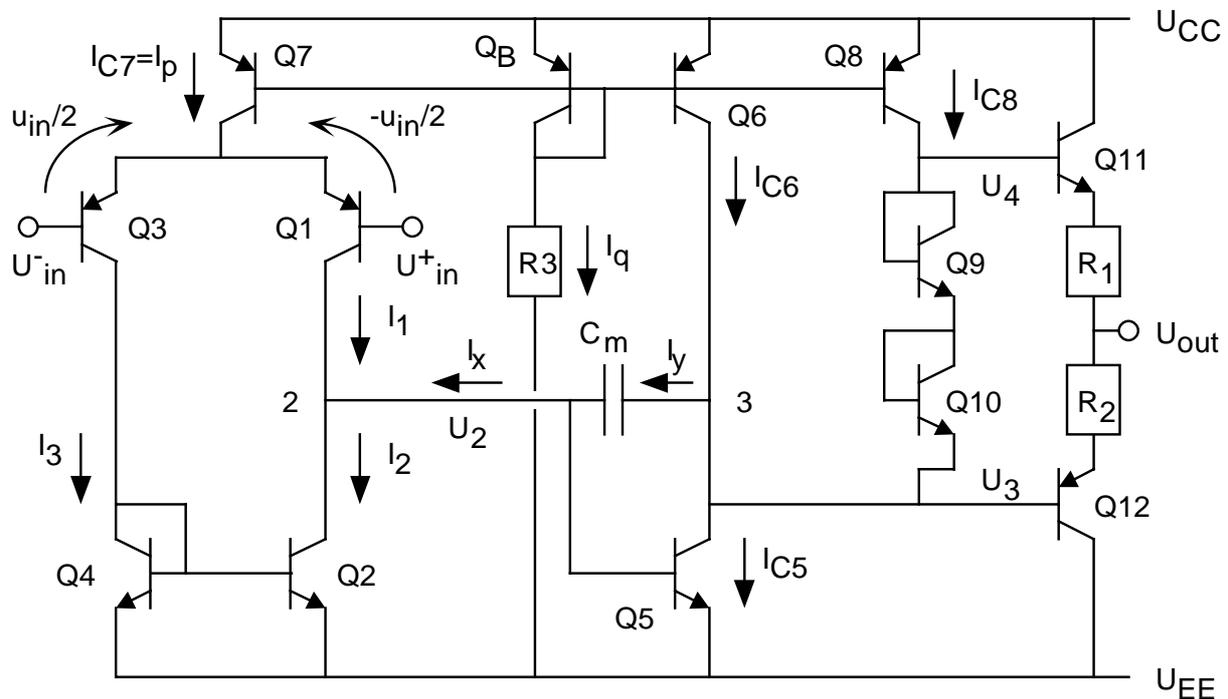


Abb. 1.3: Gesamtschaltung des Verstärkers

Im Folgenden sind

- o Basisströme prinzipiell als vernachlässigbar gering anzusehen
- o Basis-Emitter-Spannungen $U_{BE} = 0,7V$ anzunehmen

Gegeben seien U_{CC} und U_{EE} . Bestimmen Sie R_3 für einen geforderten Strom I_q . **(1P)**

$$R_3 = (U_{CC} - U_{EE} - 0,7V) / I_q$$

Wir setzen voraus, daß $I_p = I_{C7} = I_{C6} = I_{C8} = I_q$, weil angenommen wird, daß sich Transistoren gleichen Typs identisch verhalten. Welche Kollektor - Emitter - Spannungen U_{CEx} müssen welchen Mindestwert einhalten, damit die Stromspiegel korrekt arbeiten? **(1P)**

$$U_{CEx} \leq -0,2...0,3V \quad \text{für } x = 6, 7, 8$$

Zeigen Sie, daß der Ruhestrom des Transistors Q_5 mit $I_{Ca5} = 2I_p$ gegeben ist. **(1P)**

$$I_{Ca5} = I_{C6} + I_{C8} = I_q + I_q = 2I_q = 2I_p \quad \text{da } I_p = I_q$$

Wie groß ist der Strom $I_{y,max} = \max\{I_y\}$, der vom Knoten 3 aus in die Kapazität C_m geschickt werden kann ? (1P)

$$I_{y,max} = I_{Ca5} = 2I_p \quad \text{wenn Q5 sperrt.}$$

Die Ruhestrom-Einstellung welcher Stufe (Eingangsstufe oder Zwischenverstärker) begrenzt hier (und auch typischerweise) die Slew Rate und warum ? (2P)

Der Ruhestrom der Eingangsstufe,

$$\text{da } I_x = I_y \text{ sein muß, und } I_{x,max} = I_p < I_{y,max} = 2I_p.$$

In welchem Bereich bewegt sich der Kollektorstrom von Q5 ? (Man bedenke: $-I_p \leq I_x \leq I_p$) (1P)

$$I_{C5} = I_{Ca5} - I_y = I_{Ca5} - I_x = I_p \dots 3I_p$$

Auf welchem Potential liegt die Spannung U_2 ? (1P)

$$U_2 = U_{EE} + U_{BE5} = U_{EE} + 0,7V$$

Welche Aufgabe haben die Transistoren Q9, Q10 ? (1P)

Vorspannungserzeugung für die Ausgangstransistoren Q11, Q12

Wie groß ist die Spannungsdifferenz $U_4 - U_3$? (1P)

$$U_4 - U_3 = U_{BE9} + U_{BE10} = 0,7V + 0,7V = 1,4V$$

In welcher Größenordnung (Zehntel Ohm, $K\Omega$, $M\Omega$) sind die Widerstände R_1 , R_2 ? (1P)

einige Zehntel Ohm

Was ist die Aufgabe der Widerstände R_1 , R_2 ? (1P)

Begrenzung des Ruhestroms durch die Endstufentransistoren

In welcher Betriebsart arbeitet die Endstufe (z.B. A-, B-, C-, D- ... Betrieb). (1P)

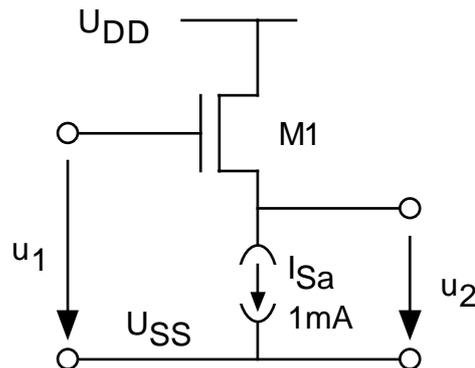
AB - Betrieb

2 Source - Folger und Emitter - Folger**(Σ 40P)**

Alle in Aufgabe 2 genannten Impedanzen sind als Kleinsignalgrößen aufzufassen.
Zu berechnen sind jeweils Formel und Wert. Es sei $I_{Sa} = I_{Ea} = 1 \text{ mA}$, $u_T = 25 \text{ mV}$

2.1 Source - Folger ohne Last**(Σ 6P)****Abb. 2.1:**

Source - Folger ohne Last



Berechnen Sie die Eingangsimpedanz des Source - Folgers in Abb. 2.1

(1P)

$$Z_{in} \rightarrow \infty$$

Gegeben sei die Schwellenspannung $V_T = -3 \text{ V}$ und $I_{DSS} = 9 \text{ mA}$ für den Transistor M1.
Berechnen Sie den Übertragungsleitwert des Transistors M1

(2P)

$$g_m = \frac{2}{|V_T|} \sqrt{I_D I_{DSS}} = \frac{2}{|V_T|} \sqrt{I_{Ea} I_{DSS}} = \frac{2}{3 \text{ V}} \sqrt{1 \text{ mA} \cdot 9 \text{ mA}} = 2 \text{ mS}$$

Berechnen Sie die Ausgangsimpedanz der Stufe

(2P)

$$Z_{out} = \infty \parallel 1/g_m = 1/g_m = 500 \Omega$$

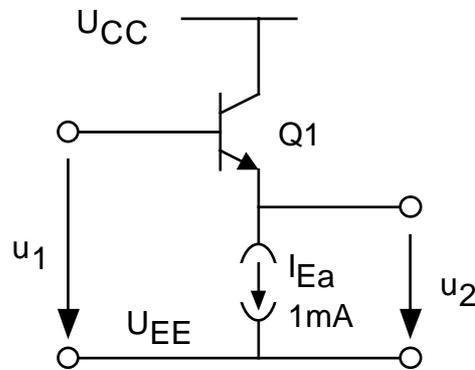
Berechnen Sie die Kleinsignal - Spannungsverstärkung der Stufe (ohne Last)

(1P)

$$A_V = g_m Z_{out} = g_m \cdot 1/g_m = 1$$

2.2 Emitter - Folger ohne Last**(Σ 10P)**Gegeben sei die Stromverstärkung $\beta = 150$ des Transistors Q1.**Abb. 2.2:**

Emitter - Folger ohne Last



Berechnen Sie die Eingangsimpedanz des Emitter - Folgers in Abb. 2.2

(1P)

$$Z_{in} = r_{BE} + \beta R_S = r_{BE} + \beta \infty \rightarrow \infty$$

Berechnen Sie den Übertragungsleitwert des Transistors Q1

(2P)

$$g_m = I_C / u_T = I_{Ea} / u_T = 1 \text{ mA} / 25 \text{ mV} = 1/25 \Omega = 40 \text{ mS}$$

Berechnen Sie die Ausgangsimpedanz der Stufe

(2P)

$$Z_{out} = \infty \parallel 1/g_m = 1/g_m = 25 \Omega$$

Berechnen Sie die Kleinsignal - Spannungsverstärkung der Stufe (ohne Last)

(1P)

$$A_V = g_m Z_{out} = g_m \cdot 1/g_m = 1$$

Berechnen Sie die Kleinsignal - Spannungsverstärkung der Stufe nach Anhängen eines Lastwiderstandes von $R_L = 1 \text{ K}\Omega$ **(4P)**

$$Z_{out} = g_m^{-1} \parallel R_L = \frac{g_m^{-1} \cdot R_L}{g_m^{-1} + R_L} = \frac{R_L}{1 + g_m R_L} = \frac{1000\Omega}{1 + 1000\Omega / 25\Omega} = \frac{1000\Omega}{41} = 24,39\Omega$$

$$A_V = g_m Z_{out} = \frac{1}{25\Omega} 24,39\Omega = 0,9756$$

2.3 Slew Rate (SR) des belasteten Emittter - Folgers (Σ 24P)

Abb. 2.3 (a) zeigt einen kapazitiv belasteten Emittter - Folger. Abb. 2.3 (b) zeigt das Eingangssignal U_1 . Konstruiert werden soll das Ausgangssignal U_2 . **Liefen Sie im Folgenden prinzipiell Formel und Wert.**

Es sei: $I_{Ea} = 1mA$, $C_L = 2\mu F$, $U_{BE} = 0,7V$ für $I_E > 0$
 $U_{BE} \leq 0,7V$ für $I_E \leq 0$

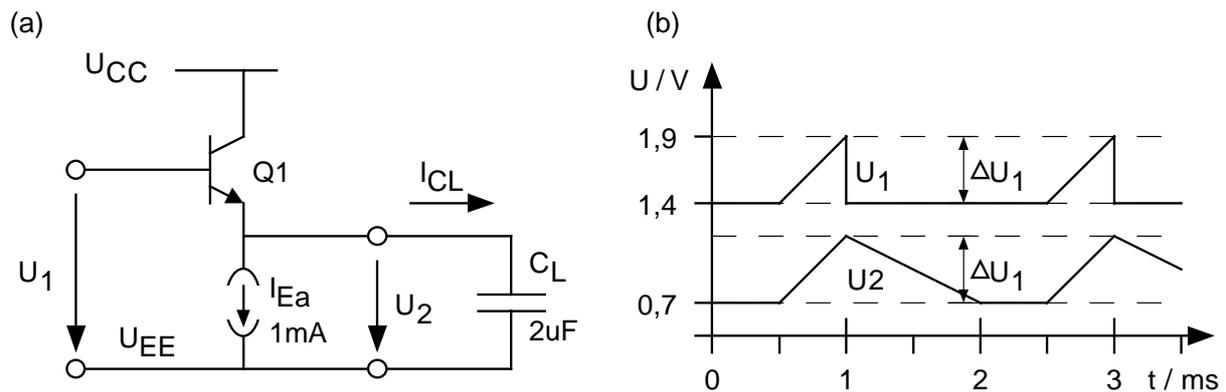


Abb. 2.3: Emittter - Folger mit kapazitiver Belastung

Berechnen Sie die Spannungsänderung dU_2/dt während der ansteigenden Flanke von U_1 . (2P)

$$\frac{dU_2}{dt} = \frac{dU_1}{dt} = \frac{\Delta U_1}{\Delta t} = \frac{0,5V}{0,5ms} = 1 \frac{V}{ms}$$

Berechnen Sie I_{CL}^+ , das ist der Strom durch C_L während der ansteigenden Flanke von U_1 . (2P)

$$I_{CL}^+ = C_L \frac{dU_2}{dt} = 2 \cdot 10^{-6} \frac{As}{V} \cdot 10^3 \frac{V}{s} = 2mA$$

Berechnen Sie den Emittterstrom $I_{E,max}$, das ist I_E während der ansteigenden Flanke von U_1 . (2P)

$$I_{E,max} = I_{Ea} + I_{CL}^+ = 1mA + 2mA = 3mA$$

Wie groß ist der Emittterstrom $I_{E,min}$, das ist I_E unmittelbar nach dem negativen Sprung von U_1 ? (1P)

$$I_{E,min} = 0 \text{ da } U_{BE} < 0,7V$$

Wie groß ist I_{CL}^- , das ist der Strom durch C_L unmittelbar nach dem negativen Sprung von U_1 . (2P)

$$I_{CL}^- = -I_{Ea} = -1mA$$

Berechnen Sie dU_2/dt unmittelbar nach dem negativen Sprung von U_1 . (2P)

$$\frac{dU_2}{dt} = \frac{I_{CL}^-}{C_L} = \frac{-1 \cdot 10^{-3} A}{2 \cdot 10^{-6} As / V} = -0,5 \frac{V}{ms}$$

Welche Slew-Rate SR garantieren Sie dem Anwender dieser Schaltung ?
Zur Erinnerung: $SR = \min\{|SR_{pos}|, |SR_{neg}|\}$. (2P)

$$SR = \min\{|SR_{pos}|, |SR_{neg}|\} = \min\{\infty, |-0,5V/s|\} = 0,5V/s$$

Sie speisen am Eingang ein Sinussignal $U_1(t) = \hat{U}_1 \sin(\omega t)$ ein. Berechnen Sie die maximale Steigung $S_{max} = \max\{|S|\}$ bei $S = dU_1/dt$. (2P)

$$S = dU_1/dt = \hat{U}_1 \cos(\omega t) \Rightarrow S_{max} = \max\{|\hat{U}_1 \cos(\omega t)|\} = \hat{U}_1 \omega$$

Welche maximale Frequenz f_{max} kann für $\hat{U}_1 = 0,5V$ mit diesem Emitter - Folger verzerrungsfrei übertragen werden ? (4P)

$$S_{max} = \hat{U}_1 \omega_{max} = SR = 0,5 V/ms$$

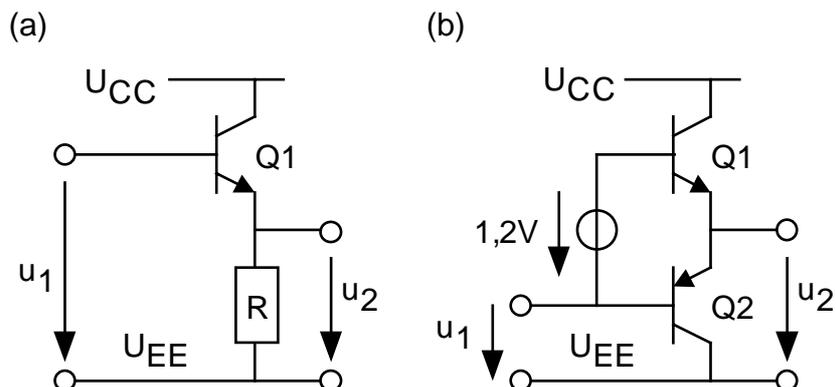
$$f_{max} = \frac{SR}{2\pi\hat{U}_1} = \frac{0,5 \cdot 10^3 V / s}{2\pi \cdot 0,5V} = 159Hz$$

Zeichnen Sie in Abb. 2.3 (b) die Kurve $U_2(t)$ ein (4P)

In Abb. 2.4 sehen sie zwei alternative Schaltungen zu der in Abb. 2.3. Kreuzen Sie (a) oder (b) an, je nachdem, welche Schaltung Sie für geeigneter halten, das Problem der begrenzten Slew-Rate zu beheben. (1P)

Abb. 2.4:

Mögliche Alternativen zur Schaltung in Abb. 2.3 .



3 Kompensation

(Σ 26P)

3.1 Ermittlung der offenen Schleifenverstärkung $k \cdot A_V$ (Σ 6P)

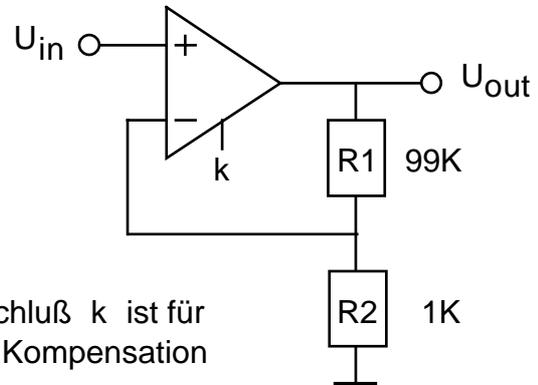
Abb. 3.1: Ermittlung von kA_V :

(a)
Nicht - invertierend geschalteter
Operationsverstärker.

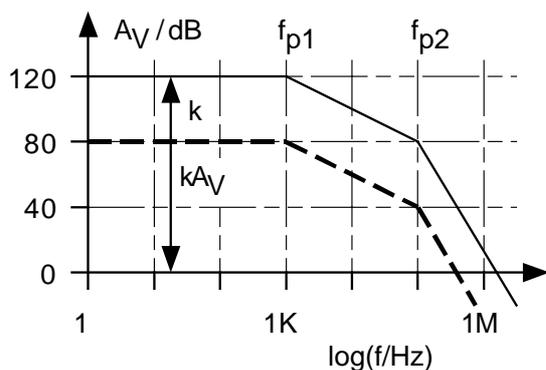
(b)
Verschiebung der Kennlinie

(c)
Verschiebung der Abszisse

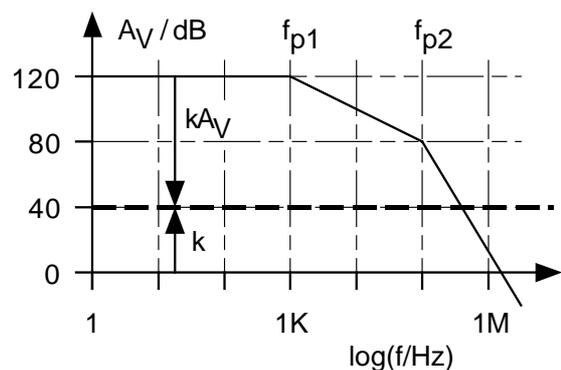
(a)



(b)



(c)



Welche Dämpfung liefert das Rückkopplungsnetzwerk des OPs in Abb. 3.1 (a) ?

(1P)

$$k = R_2 / (R_1 + R_2) = 1\text{K}\Omega / 10\text{K}\Omega = 0,01$$

Wie groß ist die Verstärkung A_V^* der Schaltung in Abb. 3.1 (a) ?

(1P)

$$A_V^* = 1/k = 100$$

Zeichnen Sie in Abb. 3.1 (b) die Kurve $k \cdot A_V$ ein. (Hier keine Achsverschiebungen!) Zeichnen Sie mit Pfeilen die Dämpfung k und die offene Schleifenverstärkung $k \cdot A_V$ ein.

(2P)

Erzielen Sie in Abb. 3.1 (c) die selben Resultate wie in Abb. 3.1 (b) durch eine einfache Achsverschiebung. Zeichnen Sie mit Pfeilen die Dämpfung k und die offene Schleifenverstärkung $k \cdot A_V$ ein.

(2P)

3.2 Kompensation mit Widerstand

(Σ 6P)

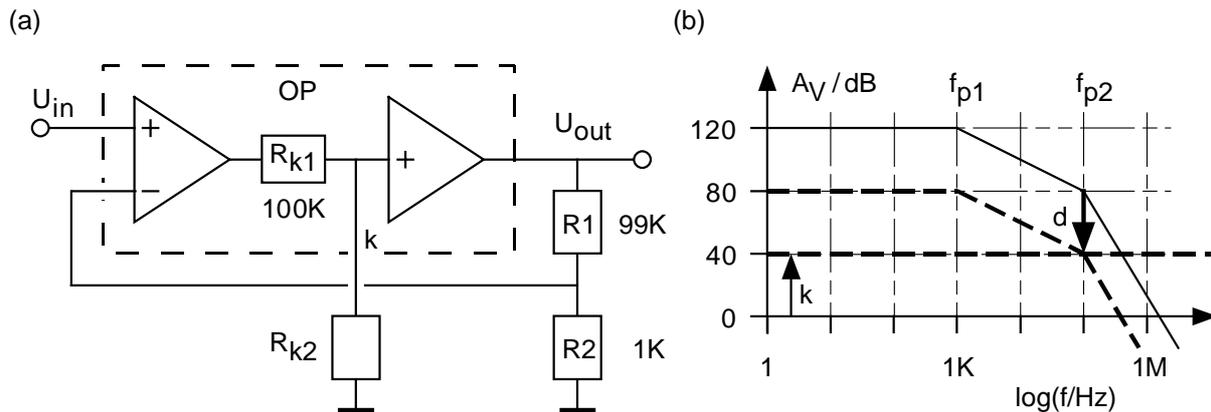


Abb. 3.2: Kompensation mit Widerstand R_{k2} . (a) Stromlaufplan und (b) Bode - Diagramm

Abb. 3.2 zeigt den selben OP mit dem selben Rückkopplungsnetzwerk wie Abb. 3.1. Der OP ist jedoch in zwei Stufen aufgelöst, um den Innenwiderstand zwischen den Stufen für die Kompensation darstellen zu können. Der Eingangswiderstand der zweiten Stufe sei sehr groß.

Ermitteln Sie graphisch (die Zeichnung muß nachvollziehbar sein!) welche Dämpfung d der Spannungsteiler R_{k1} , R_{k2} aufweisen muß, um dem System eine Phasenreserve von 45° zu verleihen. Kennzeichnen Sie in Abb. 3.2 (b) durch einen Pfeil, wie sie auf diese Dämpfung kommen. (2P)

Beschreiben Sie den Vorgang mit wenigen Stichworten verbal. (2P)

$kA_V(f_{p2})$ muß auf $1/k = 100$ gedrückt werden.

$$d = 40\text{dB} - 80\text{dB} = -40\text{dB} = 1/100$$

Berechnen Sie den Widerstand R_{k2} , der notwendig ist, um die gewünschte Phasenreserve von 45° zu erreichen. (2P)

$$\frac{R_{k2}}{R_{k1} + R_{k2}} = \frac{1}{100} \Rightarrow 100R_{k2} = R_{k1} + R_{k2} \Rightarrow 99R_{k2} = R_{k1} \Rightarrow$$

$$R_{k2} = \frac{R_{k1}}{99} = 1,01\text{K}\Omega$$

3.3 Kompensation mit Kapazität

(Σ 6P)

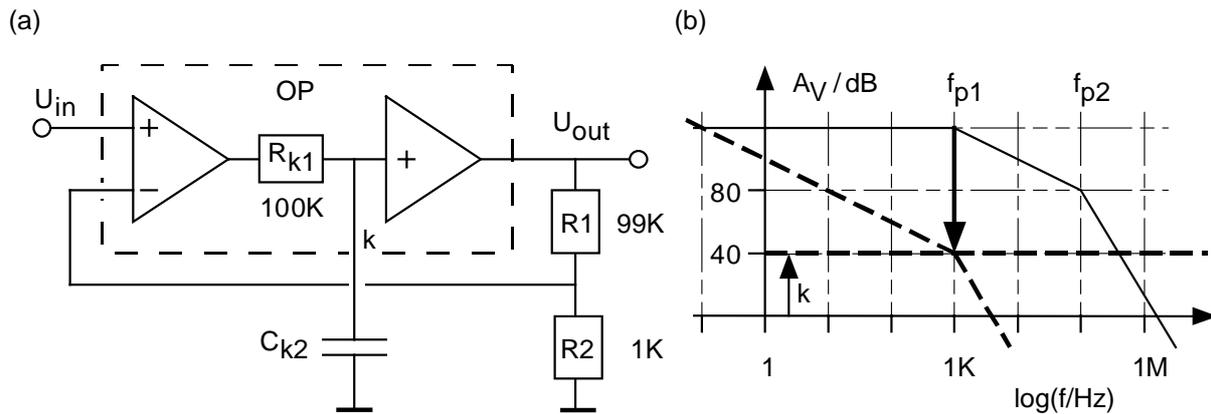


Abb. 3.3: Kompensation mit Kapazität \$C_{k2}\$. (a) Stromlaufplan und (b) Bode - Diagramm

Abb. 3.3 zeigt den selben OP mit dem selben Rückkopplungsnetzwerk wie Abb. 3.2. Der Widerstand \$R_{k2}\$ wurde jedoch durch eine Kapazität \$C_{k2}\$ ersetzt.

Ermitteln Sie graphisch (die Zeichnung muß nachvollziehbar sein!) den Pol des Tiefpasses \$R_{k1}\$, \$C_{k2}\$, der notwendig ist, um dem System eine Phasenreserve von \$45^\circ\$ zu verleihen. Kennzeichnen Sie in Abb. 3.3 (b) durch einen Pfeil, welcher Pol wie weit gedrückt werden muß. (2P)

Beschreiben Sie den Vorgang mit wenigen Stichworten verbal. (2P)

\$kA_V(f_{p1})\$ muß auf \$1/k = 100\$ gedrückt werden.

dann mit \$-20\text{ dB}\$ hoch bis \$A_{V0} \Rightarrow f_{p0} = 0,1\text{ Hz}\$

Berechnen Sie die Kapazität \$C_{k2}\$, die notwendig ist, um die gewünschte Phasenreserve von \$45^\circ\$ zu erreichen. (2P)

$$R_{k1} C_{k2} = \frac{1}{2\pi f_{p0}} \Rightarrow C_{k2} = \frac{1}{2\pi f_{p0} R_{k1}} = \frac{1}{2\pi \cdot 0,1\text{Hz} \cdot 100\text{K}\Omega} = 15,9\mu\text{F}$$

3.4 Kompensation mit Lead-Lag - Glied

(Σ 8P)

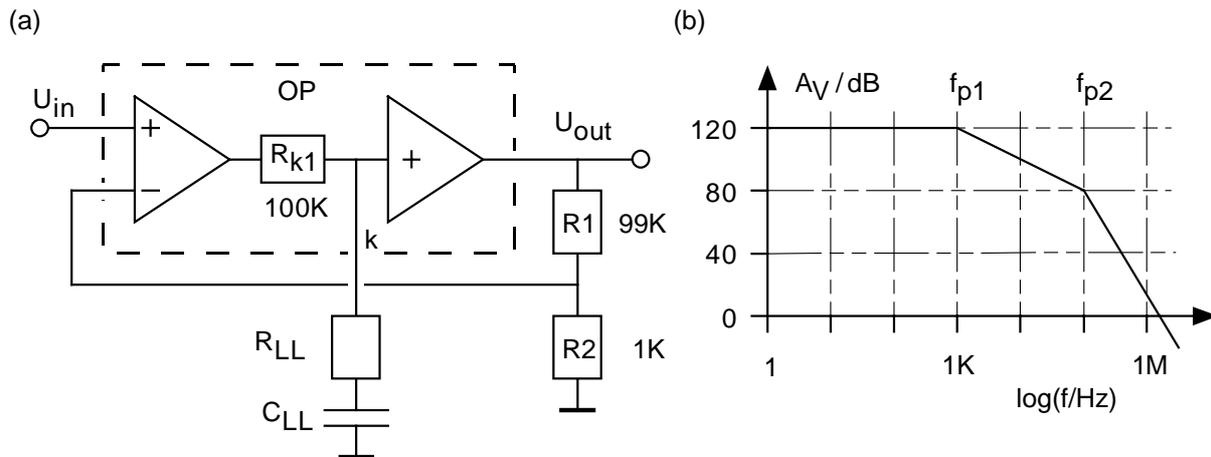


Abb. 3.4: Kompensation mit Lead-Lag - Glied R_{LL} , C_{LL} .
(a) Stromlaufplan und (b) Bode - Diagramm

Abb. 3.4 zeigt den selben OP mit dem selben Rückkopplungsnetzwerk wie Abb. 3.2. Der Widerstand R_{k2} wurde jedoch gemäß Abb. 3.4 (a) durch R_{LL} , C_{LL} ersetzt.

Ermitteln Sie graphisch (die Zeichnung muß nachvollziehbar sein!) die notwendige Dämpfung $d(f \rightarrow \infty)$ des LL-Gliedes und kennzeichnen sie diese durch einen Pfeil, um dem System eine Phasenreserve von 45° zu verleihen. Kennzeichnen Sie die Frequenz der Nullstelle des LL-Gliedes durch einen weiteren Pfeil. (2P)

Beschreiben Sie den Vorgang mit wenigen Stichworten verbal. (2P)

$kA_V(f_{p2})$ muß auf $1/k = 100$ gedrückt werden.

Die Nullstelle f_{LL0} des LL-Gliedes muß in $f_{LL0} = f_{p1} = 1\text{KHz}$ liegen

Berechnen Sie den Widerstand R_{LL} und die Kapazität C_{LL} , die notwendig sind, um die gewünschte Phasenreserve von 45° zu erreichen. (Hinweis: Wenn Sie schlau genug sind, sollte Ihnen die Berechnung für den Widerstand bekannt vorkommen!) (4P)

$$R_{LL} = R_{k2} \text{ aus Aufgabe 3.2} \Rightarrow R_{LL} = 1,01 \text{ K}\Omega$$

$$R_{LL} C_{LL} = \frac{1}{2\pi f_{LL0}} \Rightarrow C_{LL} = \frac{1}{2\pi f_{LL0} R_{LL}} = \frac{1}{2\pi \cdot 1\text{KHz} \cdot 1,01\text{K}\Omega} = 157\text{nF}$$