

# 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: \_\_\_\_\_.

Vorname: \_\_\_\_\_.

**>>>>> 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.

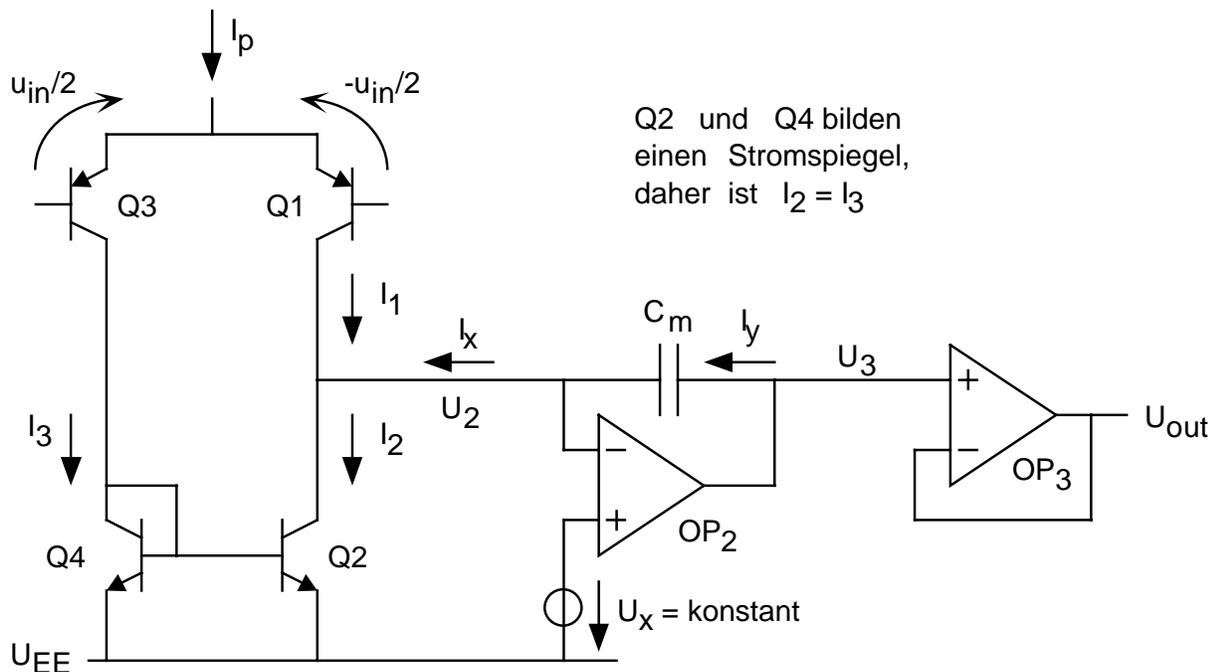
# 1 Großsignalverhalten eines Verstärkers

( $\Sigma$  48P)

## 1.1 Bestimmung der Slew-Rate (SR)

( $\Sigma$  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 OP<sub>2</sub> und OP<sub>3</sub> zusammengefaßt. Vereinfachend nehmen wir an, daß OP<sub>2</sub> und OP<sub>3</sub> ideale Operationsverstärker seien.



**Abb. 1.1:** Blockschaltbild eines Verstärkers, zwei Teilschaltungen wurden als OP<sub>2</sub> und OP<sub>3</sub> zusammengefaßt.

Welche Bauelemente in Abb. 1.1 bilden die Eingangsstufe ?

(2P)

.....

Welche Bauelemente in Abb. 1.1 bilden die Zwischenverstärkerstufe ?

(2P)

.....

Welche Bauelemente in Abb. 1.1 bilden die Endstufe ?

(1P)

.....

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)

.....

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)

.....  
.....  
.....

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)

.....

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)

.....  
.....  
.....

**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)

.....  
.....

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

.....  
.....

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

.....  
.....

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

.....  
.....

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

.....

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)

.....  
.....

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)

.....  
.....

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)

.....  
.....

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

.....  
.....

## 1.2 Auflösung der Zwischenverstärkerstufe

(Σ 6P)

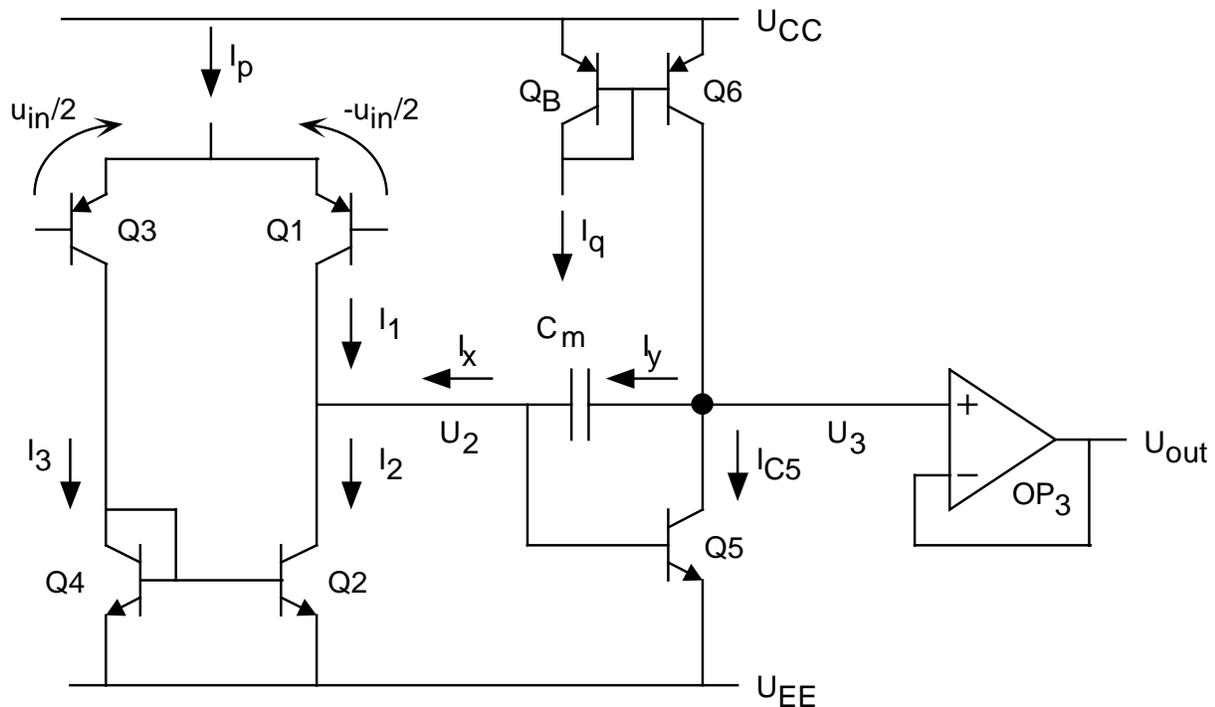


Abb. 1.2: Zwischenverstärkerstufe der Abbildung 1.1 in einzelne Komponenten aufgelöst.

In Abb. 1.2 wird die Schaltung aus Abb. 1.1 detaillierter dargestellt. Benennen Sie die Bauelemente, die  $OP_2$  aus Abb. 1.1 ersetzen. ( $Q_B$  als Teil des „Biasing circuit“ gehört nicht dazu.) (2P)

.....

Wie groß ist der Ruhestrom  $I_{Ca5}$  des Kollektors von  $Q_5$  als Funktion von  $I_q$ ? (1P)

.....

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)

.....

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

.....

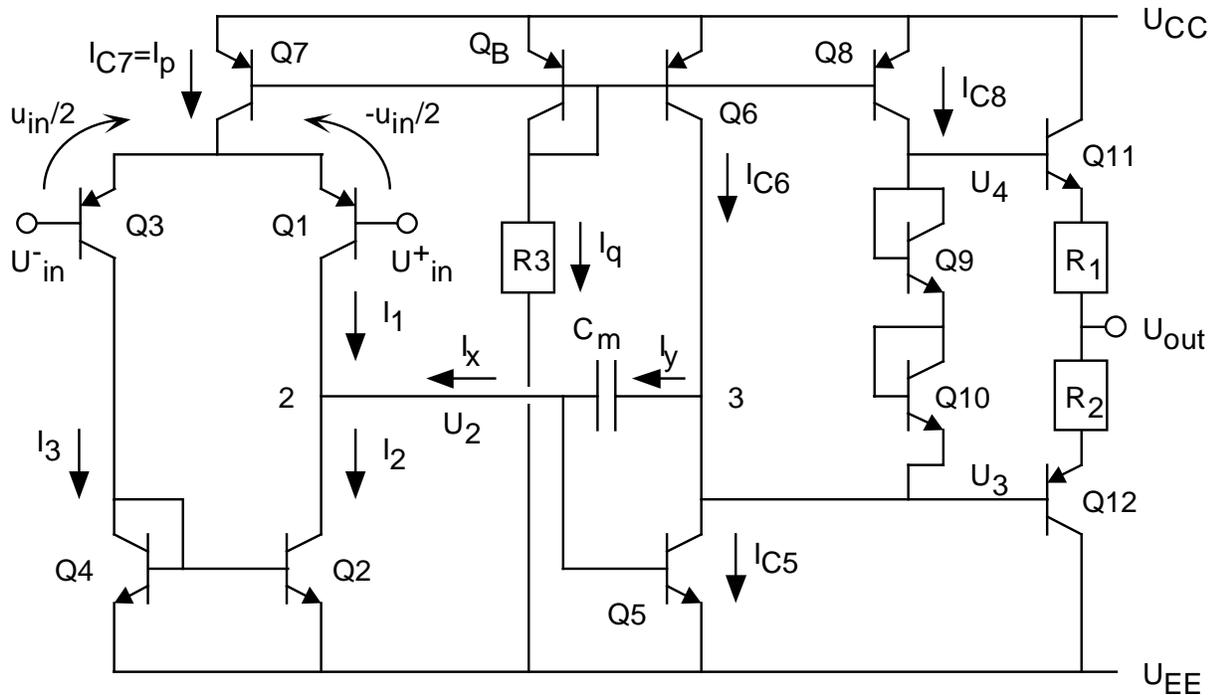


Abb. 1.3: Gesamtschaltung des Verstärkers

Im Folgenden sind  Basisströme prinzipiell als vernachlässigbar gering anzusehen  
 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)

.....

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)

.....

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

.....

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)**

.....

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

.....  
.....

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

.....

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

.....

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

.....

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

.....

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

.....

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

.....

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

.....

## 2 Source - Folger und Emitter - Folger

( $\Sigma$  40P)

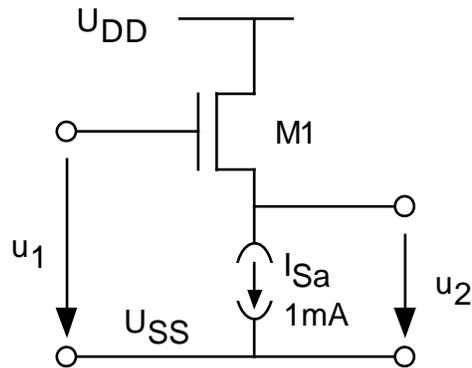
Alle in Aufgabe 2 genannten Impedanzen sind als Kleinsignalgrößen aufzufassen.  
Zu berechnen sind jeweils Formel und Wert. Es sei  $I_{Sa} = I_{Ea} = 1 \text{ mA}$ ,  $u_T = 25 \text{ mV}$

### 2.1 Source - Folger ohne Last

( $\Sigma$  6P)

Abb. 2.1:

Source - Folger ohne Last



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

(1P)

.....

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)

.....  
.....

Berechnen Sie die Ausgangsimpedanz der Stufe

(2P)

.....  
.....

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

(1P)

.....

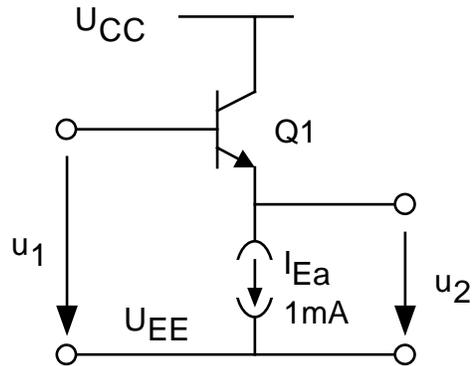
## 2.2 Emitter - Folger ohne Last

( $\Sigma$  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)

.....

Berechnen Sie den Übertragungsleitwert des Transistors Q1

(2P)

.....

Berechnen Sie die Ausgangsimpedanz der Stufe

(2P)

.....

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

(1P)

.....

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

(4P)

.....

.....

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

Abb. 2.3 (a) zeigt einen kapazitiv belasteten Emitter - 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:  $I_{Ea} = 1\text{mA}$ ,  $C_L = 2\mu\text{F}$ ,  $U_{BE} \begin{cases} = 0,7\text{V} & \text{für } I_E > 0 \\ \leq 0,7\text{V} & \text{für } I_E \leq 0 \end{cases}$

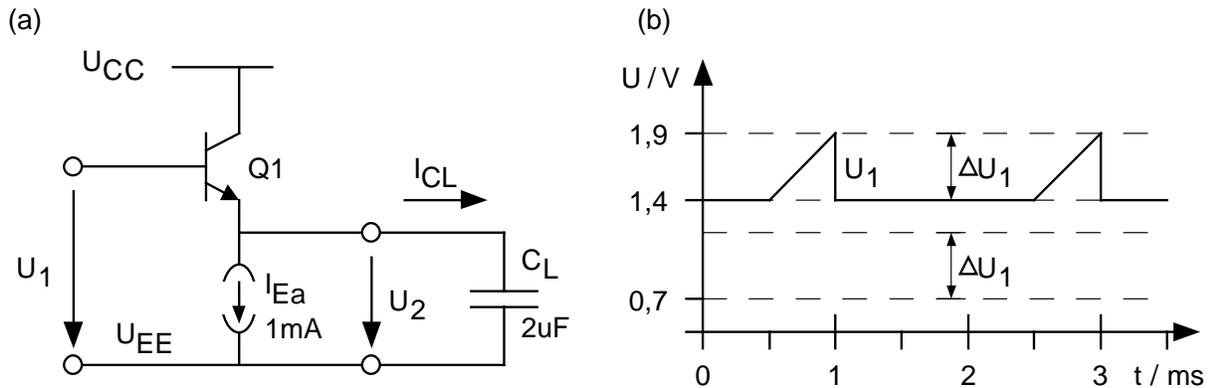


Abb. 2.3: Emitter - Folger mit kapazitiver Belastung

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

.....  
 .....

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

.....

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

.....

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

.....

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

.....

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

.....

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

.....

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)

.....

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

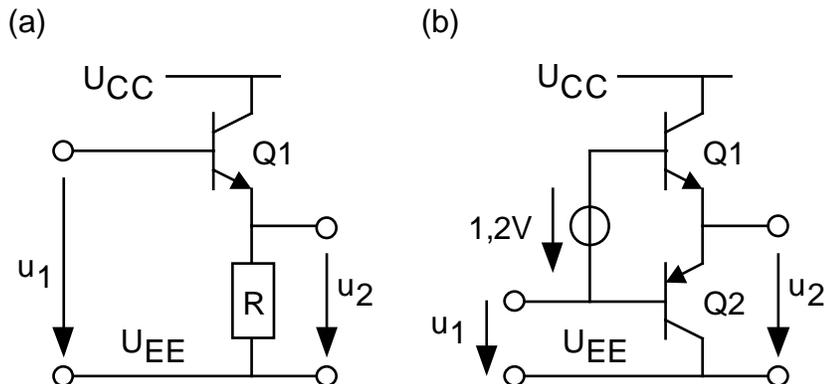
.....

.....

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)

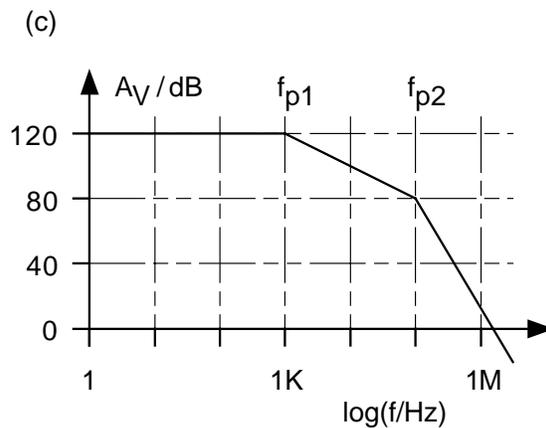
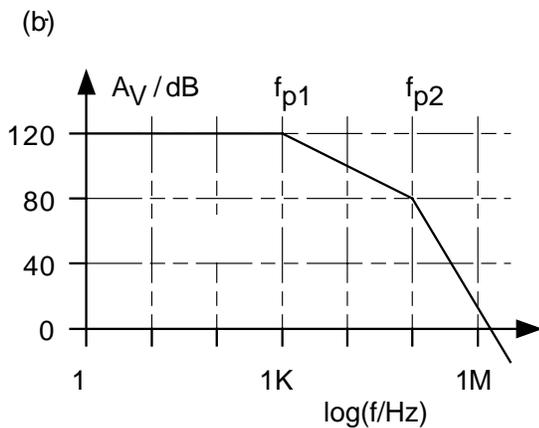
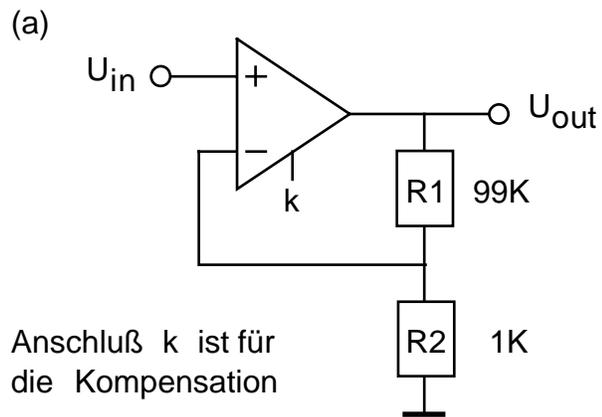
#### 3.1 Ermittlung der offenen Schleifenverstärkung $k \cdot A_V$ (Σ 6P)

Abb. 3.1: Ermittlung von  $k A_V$  :

(a)  
Nicht - invertierend geschalteter  
Operationsverstärker.

(b)  
Verschiebung der Kennlinie

(c)  
Verschiebung der Abszisse



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

(1P)

.....

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

(1P)

.....

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)

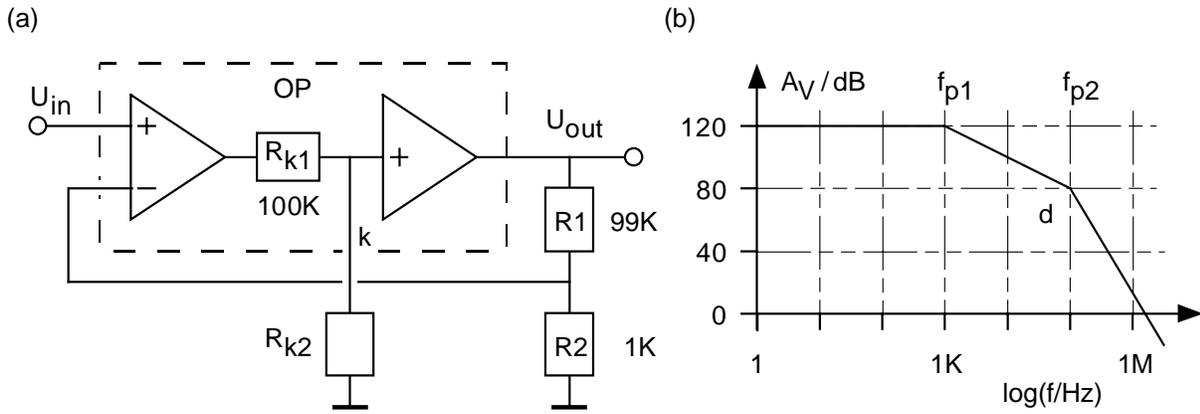


Abb. 3.2: Kompensation mit Widerstand  $R_{k2}$ . (a) Stromlaufplan und (b) Bode - Diagramm

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  $45^\circ$  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)

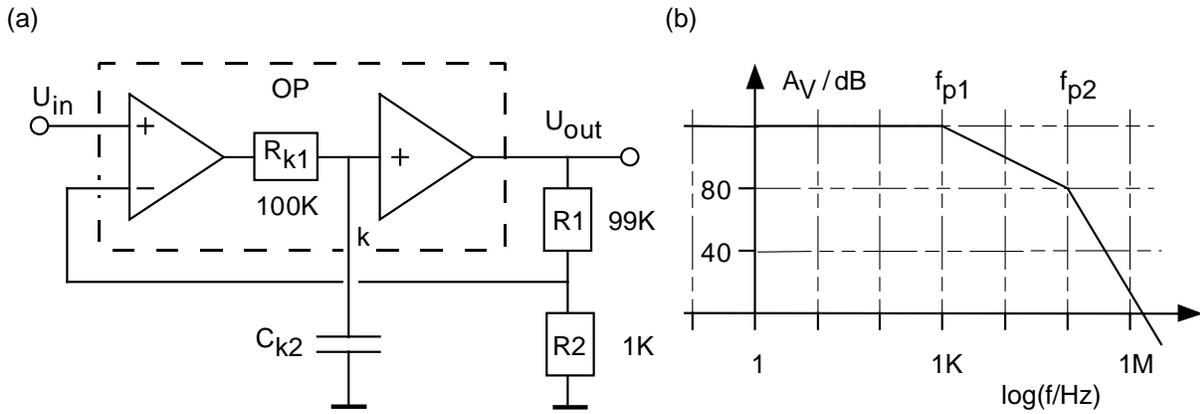
.....  
 .....

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

.....  
 .....

### 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)

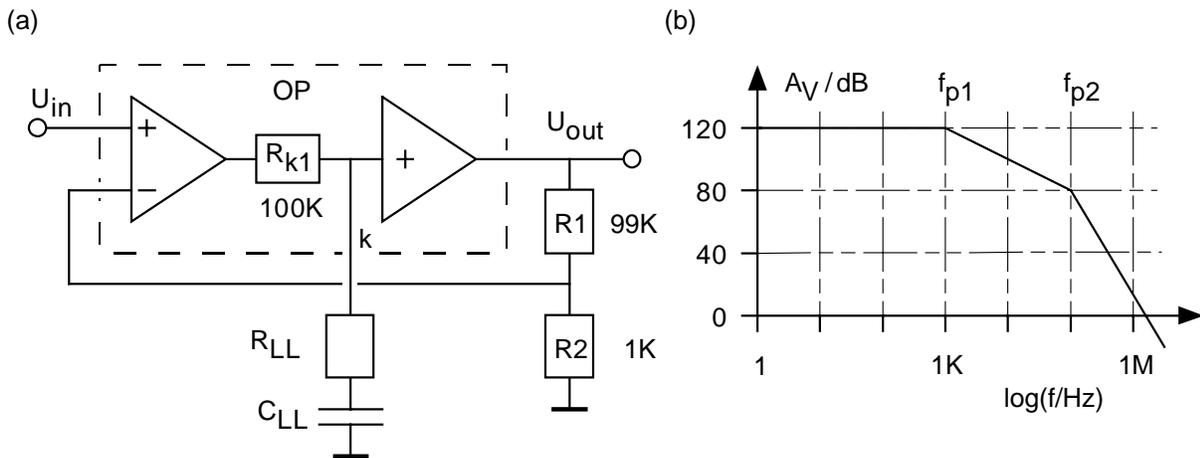
.....  
 .....

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

.....  
 .....

### 3.4 Kompensation mit Lead-Lag - Glied

(Σ 8P)



**Abb. 3.4:** Kompensation mit Lead-Lag - Glied  $R_{LL2}$ ,  $C_{LL}$ .  
 (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  $45^\circ$  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)

.....  
 .....

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

.....  
 .....