

Laufende Nummer

<b>Fachhochschule Regensburg</b>	
<b>Fachbereich Elektrotechnik / Mikroelektronik</b>	
Prüfungsfach:	<b>Schaltungstechnik (SC)</b>
Prüfungstermin:	24.01.1998, <b>WS 1997 / 98</b>
Prüfungsdauer:	90 Minuten (planmäßig: 10.45 - 12.15 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: 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:**

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.

Hinweis zur Korrektur: „FF“ steht für Folgefehler.

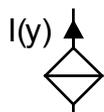
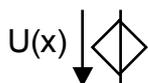
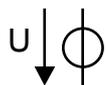
# 1 Symbole für Quellen

( $\Sigma=4P$ )

## 1.1 Normierte Symbole für Quellen

Erläutern Sie die Bedeutung der Symbole (Beispiel: pnp-Transistor).

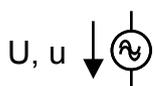
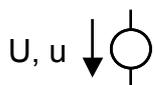
(2)



## 1.2 Andere übliche Symbole für Quellen

Erläutern Sie die Bedeutung der Symbole (Beispiel: pnp-Transistor).

(2)



## 2 Grundlagen Netzwerke

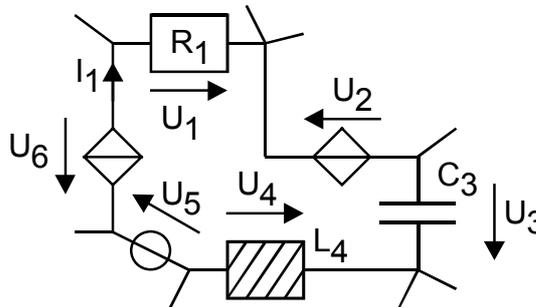
( $\Sigma=15P$ )

### 2.1 Kirchhoff'sche Maschenregel

( $\Sigma=3P$ )

Abbildung 2.1:

Spannungen einer geschlossenen Masche eines Netzwerkes



Formulieren Sie das Kirchhoff'sche Gesetz bzgl. Spannungen eines geschlossenen Umlaufes um die Masche einer Schaltung verbal. (1P)

.....  
 .....

Wenden Sie die Kirchhoff'sche Maschenregel für auf die Spannungen in Abb. 2.1 an (Formel) (1P)

.....

In Abb. 2.1 sei  $U_1=1V$ ,  $U_2=2V$ ,  $U_3=3V$ ,  $U_4=4V$ ,  $U_5=5V$ . Wie groß ist  $U_6$ ? (1P)

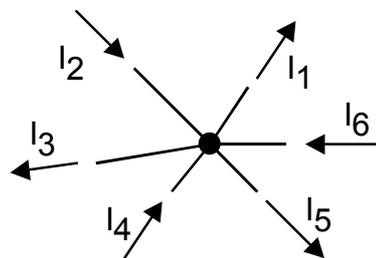
.....

### 2.2 Kirchhoff'sche Knotenregel

( $\Sigma=3P$ )

Abbildung 2.2:

Ströme an einem Knoten eines Netzwerkes



Formulieren Sie das Kirchhoff'sche Gesetz bzgl. Strömen in einen Schaltungsknoten verbal. (1P)

.....

.....  
 Wenden Sie das Kirchhoff'sche Gesetz für auf die Situation in Abb. 2.2 an (Formel) (1P)

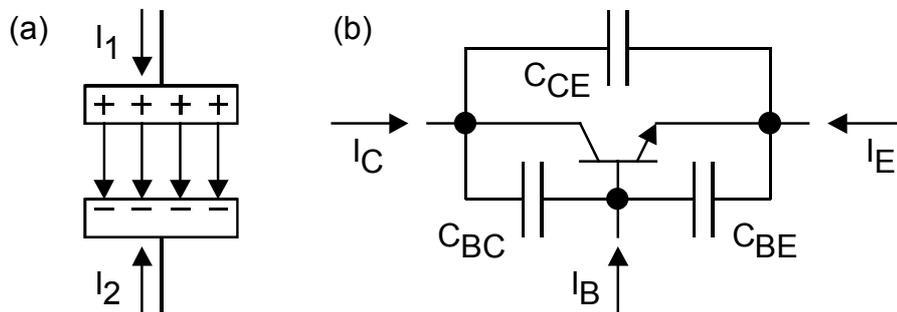
.....  
 In Abb. 2.2 sei  $I_1=1\text{mA}$ ,  $I_2=2\text{mA}$ ,  $I_3=3\text{mA}$ ,  $I_4=4\text{mA}$ ,  $I_5=5\text{mA}$ . Wie groß ist  $I_6$ ? (1P)

**2.3 Ströme und Ladungen eines Bauelementes (Σ=4P)**

Abbildung 2.3:

(a) Kapazität.

(b) Bipolartransistor,  
 interne Kapazitäten  
 explizit  
 gezeichnet



Wie groß ist die Summe  $I_{\text{gesamt}}$  aller Ströme (i.e.  $I_1, I_2$ ) in die Kapazität in Abb. 2.3(a)? (1P)

.....  
 Wie groß ist die Ladung  $Q_1$  auf der oberen Kondensatorplatte als Funktion von  $I_1$  (Formel)? (1P)

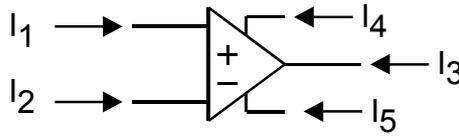
.....  
 Wie groß ist die gesamte Ladung  $Q_{\text{gesamt}}(I_{\text{gesamt}})$  in der Kapazität in Abb. 2.3(a)? (1P)

.....  
 Wie groß ist die Summe  $I_{\text{gesamt}}$  aller Ströme (i.e.  $I_C, I_B, I_E$ ) in den Transistor in Abb. 2.3(b)? (0,5P)

.....  
 Wie groß ist die gesamte Ladung  $Q_{\text{gesamt}}(I_{\text{gesamt}})$  in dem Transistor in Abb. 2.3(b)? (0,5P)

**2.4 Ströme und Ladungen einer Schaltung** **(Σ=2P)**

**Abbildung 2.4:**  
Operationsverstärker



Wie groß ist die Summe aller Ströme in eine Schaltung aus diskreten Komponenten, z.B. den OP in Abb. 2.4 ? (Es bestehen keine galvanischen Verbindungen oder kapazitive Kopplungen zum Umfeld der Schaltung als den eingezeichneten.)

Formel allgemein: ..... (0.5P)

Formel bezogen auf Abb. 2.4: ..... (0.5P)

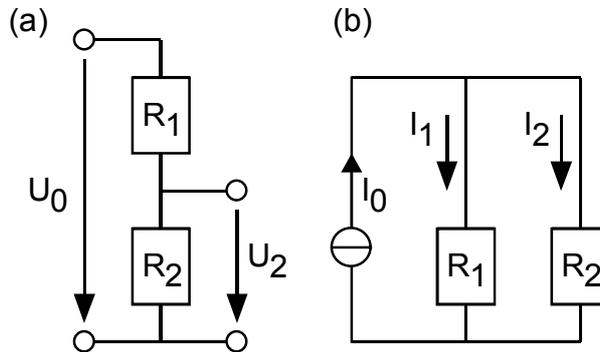
Wie groß ist die gesamte Ladung  $Q_{\text{gesamt}}(I_{\text{gesamt}})$  einer Schaltung, z.B. des OPs in Abb. 2.4? (1P)

.....

**2.5 Spannungs- und Stromteiler** **(Σ=3P)**

Es sei  $G_1 = 1/R_1$  und  $G_2 = 1/R_2$ .

**Abbildung 2.5:**  
a) Spannungsteiler  
b) Stromteiler



Wie groß ist  $U_2$  als Funktion von  $G_1, G_2, U_0$  in Abb. 2.5(a) ? (1P)

.....

Wie groß ist  $I_1$  als Funktion von  $G_1, G_2, I_0$  in Abb. 2.5(b) ? (1P)

.....

Wie groß ist  $I_2$  als Funktion von  $R_1, R_2, I_0$  in Abb. 2.5(b) ? (1P)

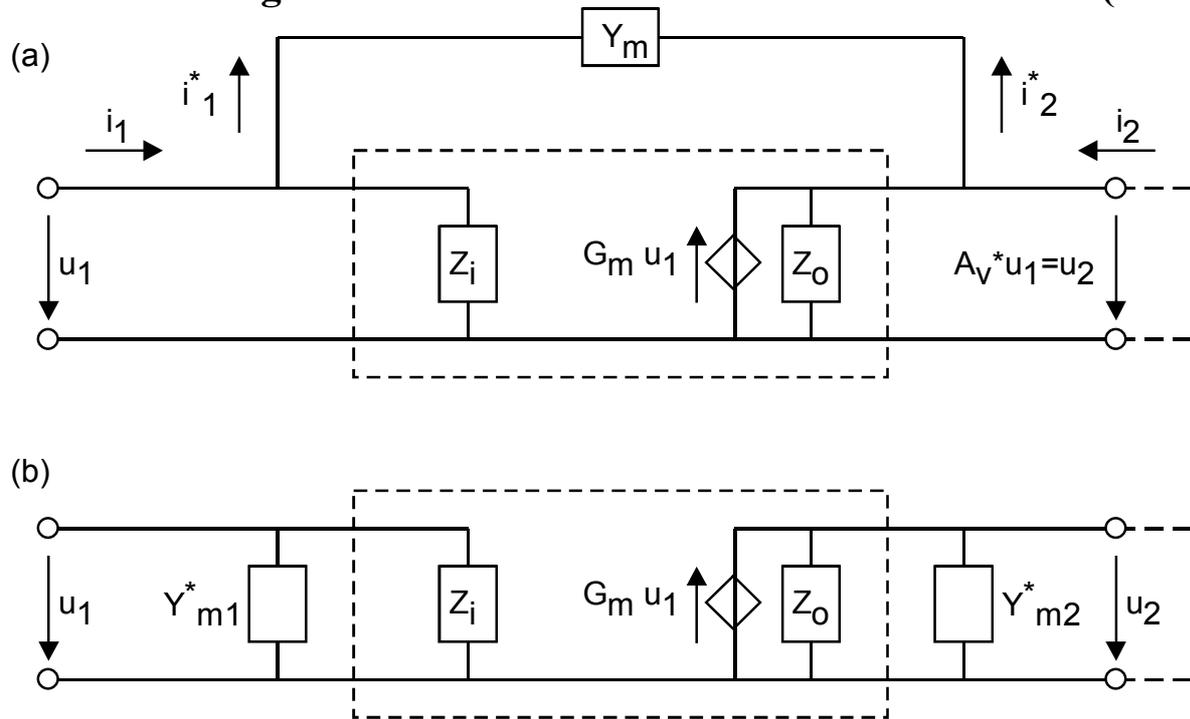
.....

### 3 Miller-Effekt

( $\Sigma=11P$ )

#### 3.1 Herleitung

( $\Sigma=5P$ )



**Abbildung 3.1:** (a) Leitwert  $Y_m$  über einem Schaltungsteil mit  $u_2 = A_v u_1$ ,  
 (b) Umformung der Schaltung nach Miller.

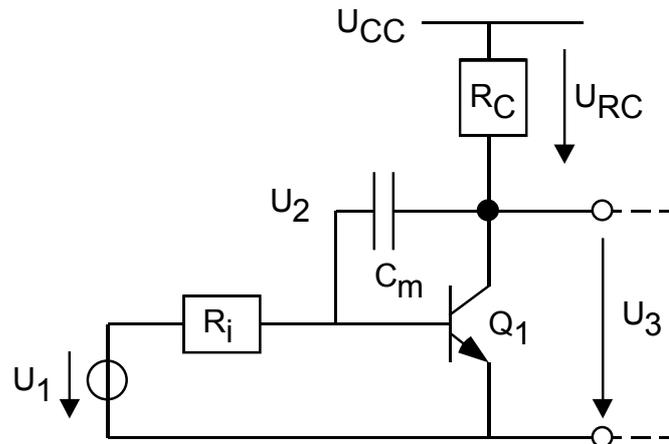
Abb. 3.1(a) zeigt eine Schaltung mit  $u_2 = A_v u_1$  und einem Leitwert  $Y_m$  zwischen  $u_1$  und  $u_2$ . Diese Schaltung läßt sich nach dem Theorem von Miller in die Schaltung von Abb. 3.1(b) umformen. Zeigen Sie, daß  $Y_{m1}^* = (1-A_v)Y_m$ . (3P)

Berechnen Sie  $Y_{m2}^*$  als Funktion von  $A_v$  und  $Y_m$ . (2P)

### 3.2 Miller-Effekt Anwendung

( $\Sigma=6P$ )

**Abbildung 3.2:**  
Schaltung mit  
Miller-Kondensator



Die Schaltung in Abb. 3.2 habe eine Verstärkung von  $|A_v|=200$ . Für  $R_i = 220 \Omega$  soll durch  $R_i$  und die nachfolgende kapazitive Last ein Pol in  $f_{p1} = 1 \text{ KHz}$  entstehen.

Wie groß muß  $C_{m1}^*$  sein ?

(1P)

Wie groß wählen Sie  $C_m$ ?

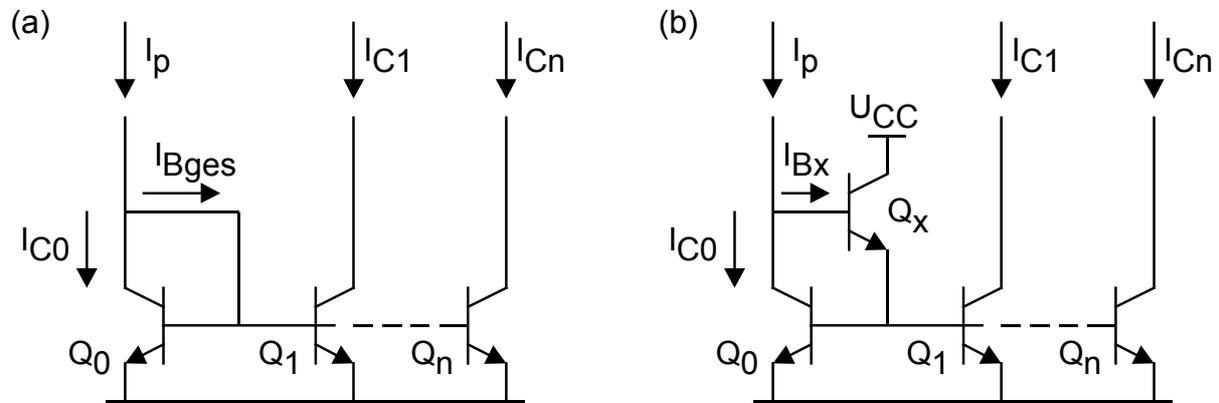
(2P)

Es ist  $I_C=1\text{mA}$  bei  $u_T=kT/q=25\text{mV}$ . Ferner ist der Innenwiderstand des Transistors  $r_{CE} \gg R_C$ .  
Wie groß ist  $R_C$  ?

(3P)

**4 Schaltungen mit bipolaren Bauelementen (Σ=29P)**

**4.1 Mehrfacher Stromspiegel (Σ=9P)**



**Abbildung 4.1:** (a) Mehrfachspiegelung, (b) Mehrfachspiegelung mit Puffer-Transistor

Abb. 4.1(a) zeigt  $n+1$  identische Transistoren  $Q_0 \dots Q_n$  mit  $I_{C_i} = I_{C_j}$  ( $i, j = 0 \dots n$ ). Berechnen Sie den Strom  $I_{B_{ges}}$  als Funktion von  $n$ ,  $\beta$ ,  $I_{C_0}$ . (2P)

.....

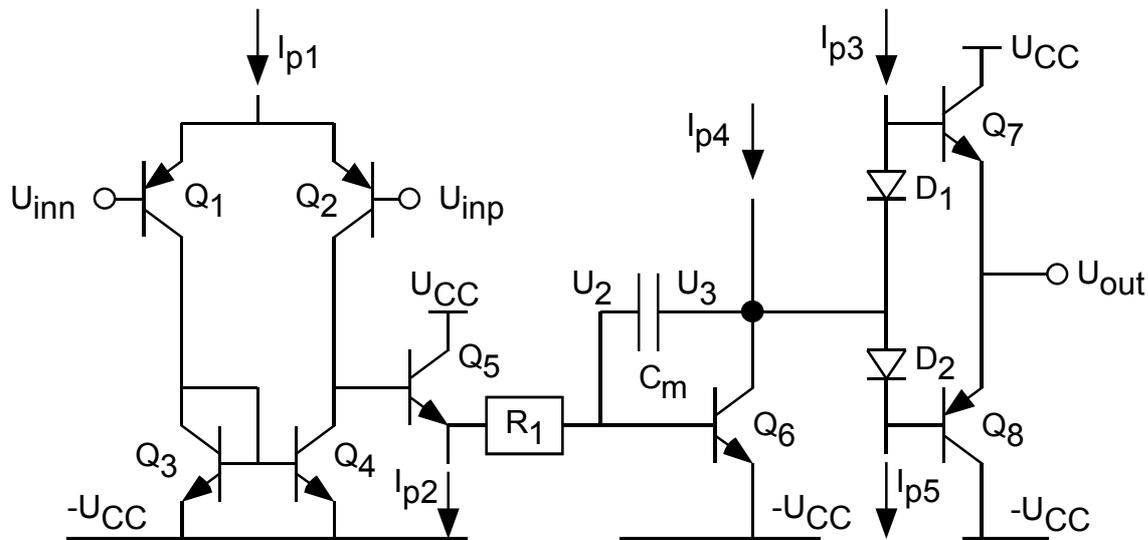
Wie groß ist der Polarisierungsstrom  $I_p$  als Funktion von  $n$ ,  $\beta$ ,  $I_{C_0}$  ? (2P)

.....

Von einem idealen Stromspiegel erwarten wir  $I_{C_i} = I_p$  für  $i = 1 \dots n$ . Wie groß ist der relative Fehler  $F_1$  als Funktion von  $n$  und  $\beta$  bei dem Stromspiegel in Abb. 4.1(a) bezogen auf  $I_p$  ? (3P)

Wie groß ist der relative Fehler  $F_2$  als Funktion von  $n$ ,  $\beta$  in Abb. 4.1(b), wenn der Transistor  $Q_x$  identische Eigenschaften hat wie alle anderen Transistoren der Schaltung ? (2P)

## 4.2 Schaltungsverständnis und Vorspannungserzeugung ( $\Sigma=10P$ )



**Abbildung 4.2:** Verstärkerschaltung

Kennzeichnen Sie durch gestrichelte Linien und Stichworte Eingangsstufe, Zwischenverstärker und Endstufe in Abb. 4.2. (Hinweis:  $Q_5$  gehöre in diesem Fall nicht zur Eingangsstufe.) (2P)

Die Schaltung in Abb. 4.2 ist unnötig kompliziert. Zeichnen Sie eine kleine Änderung ein und streichen Sie zwei Stromquellen heraus, ohne die Funktion zu verändern. (2P)

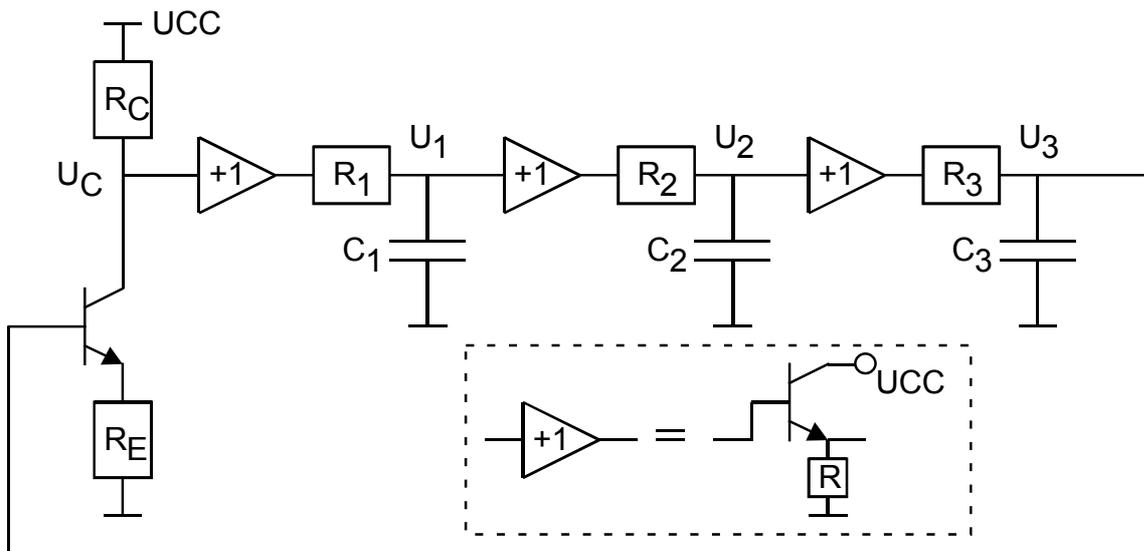
Zeichnen Sie zwei zusätzliche Widerstände  $R_x$  zur Ruhestrombegrenzung der Endstufe ein. (1P)

Wählen Sie durch Unterstreichen die Größe dieser Widerstände:  $0,22\Omega$ ,  $22\Omega$ ,  $2,2K$ ,  $220K\Omega$ . (1P)

Konstruieren Sie mit einem Widerstand und einigen bipolaren Transistoren eine Schaltung zur Erzeugung der Stromquellen  $I_{px}$ , wobei  $I_{px} \approx 1mA$  bei  $U_{CC}=6V$  und  $U_{BE_x} \approx 0,7V$  für alle  $x=1...5$  ist. (Vergessen Sie nicht, den Widerstand zu berechnen!) (4P)

**4.3 Harmonischer Oszillator**

**(Σ=10P)**



**Abbildung 4.3:** Harmonischer Oszillator

Für den Oszillator in Abb. 4.3 sei  $R_1C_1 = R_2C_2 = R_3C_3$ . Welche Phasendrehung  $\phi_0$  muß jedes dieser  $R_iC_i$ -Glieder verursachen, um eine harmonische Oszillation zu ermöglichen? (2P)

.....

Welchen Betrag  $|H(j\omega_0)|$  liefert der Amplitudengang der Übertragungsfunktion eines  $R_iC_i$ -Gliedes ( $i=1...3$ ), wenn der Phasengang  $\phi_0$  liefert? (4P)

Welche AC-Verstärkung  $|A_{v0}|$  muß die Transistorstufe bringen, um eine geschlossene Schleifenverstärkung von **1** zu erzielen? (1P)

.....

Es sei  $R_E=1\text{ K}\Omega$  in Abb. 4.3 sei. Bei der gewählten Frequenz können die internen Kapazitäten des Bipolartransistors vernachlässigt werden. Wie groß muß  $R_C$  gewählt werden, um oben berechnetes  $A_{v0}$  zu erhalten? (3P)

.....

## 5 Operationsverstärker

( $\Sigma=18P$ )

### 5.1 Einfacher Komparator

( $\Sigma=2P$ )

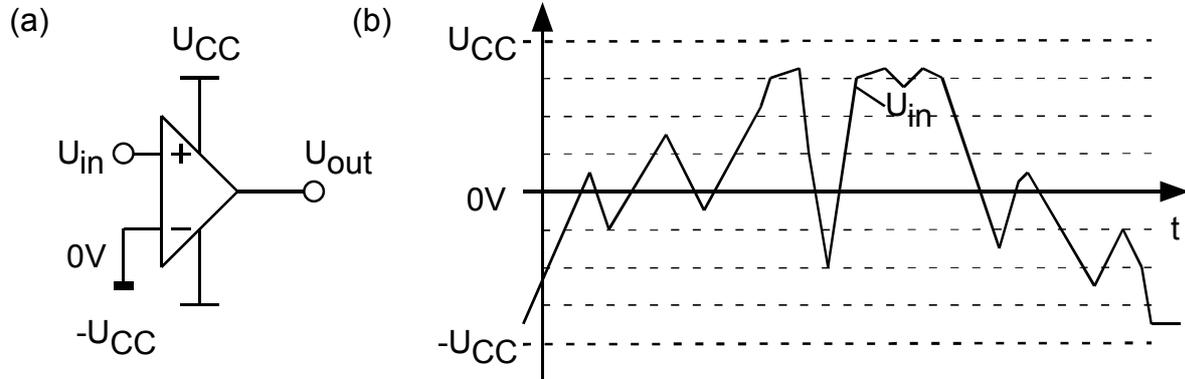


Abbildung 5.1: (a) Komparator mit Operationsverstärker und (b) Schaltverhalten

Abb. 5.1(a) zeigt einen Operationsverstärker mit symmetrischer Betriebsspannung. Der OP sei ideal mit einem echten Rail-to-Rail Ausgangsverhalten. Zeichnen Sie in Abb. 5.1(b) das Ausgangssignal  $U_{out}$  ein. (2P)

### 5.2 Komparator mit Hysterese

( $\Sigma=4P$ )

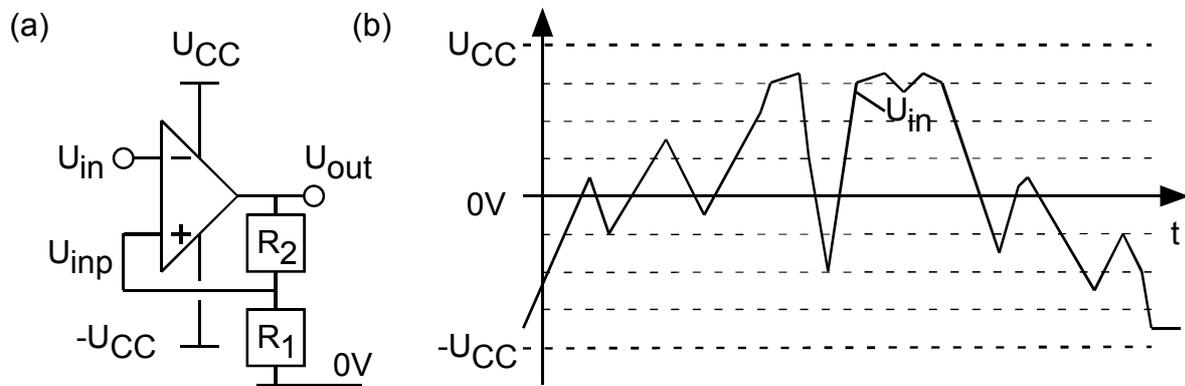


Abbildung 5.2: (a) Komparator mit Operationsverstärker und (b) Schaltverhalten

Abb. 5.2(a) zeigt einen Operationsverstärker mit symmetrischer Betriebsspannung. Der OP sei ideal mit einem echten Rail-to-Rail Ausgangsverhalten.

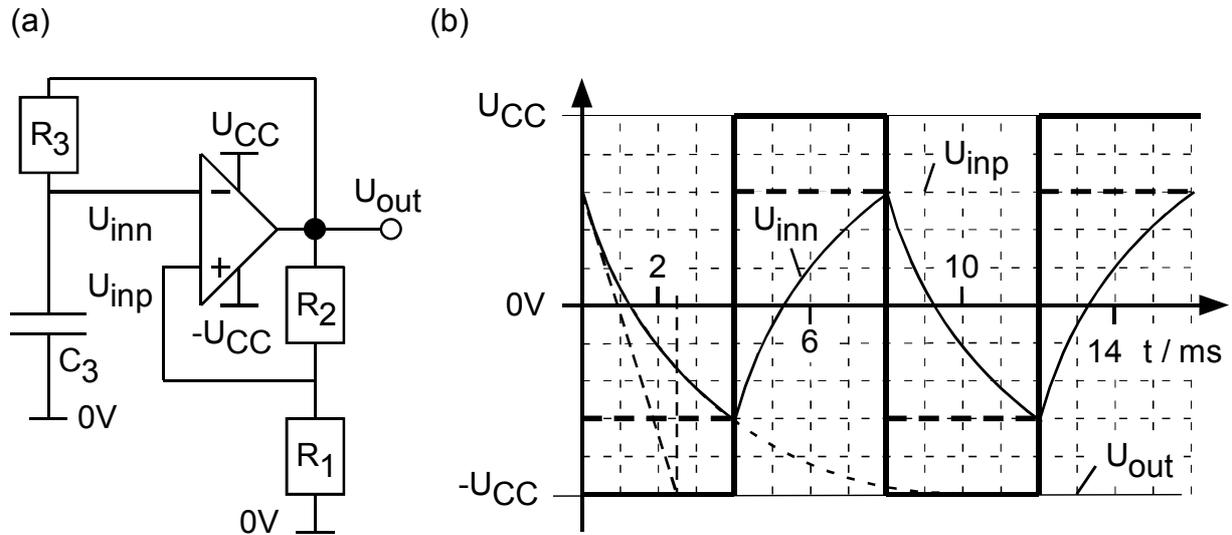
Wie nennt man eine solche Schaltung, die Hysterese durch positive Rückkopplung erzeugt? (1P)

.....

Zeichnen Sie in Abb. 5.2(b) die Signale  $U_{inp}$  und  $U_{out}$  für  $R_2 = 3R_1$  ein. (3P)

**5.3 Oszillator**

**(Σ=6P)**



**Abbildung 5.3:** Oszillator mit Operationsverstärker

Mit welcher Frequenz schwingt der Oszillator in Abb. 5.3(a) gemäß dem Diagramm in Abb. 5.3(b) ? (1P)

.....

Lesen Sie aus dem Diagramm in Abb. 5.3(b) die Zeitkonstante des  $R_3C_3$ -Gliedes ab: (2P)

.....

$R_3 = 10 \text{ K}\Omega$ , wie groß ist  $C_3$  ? (1P)

.....

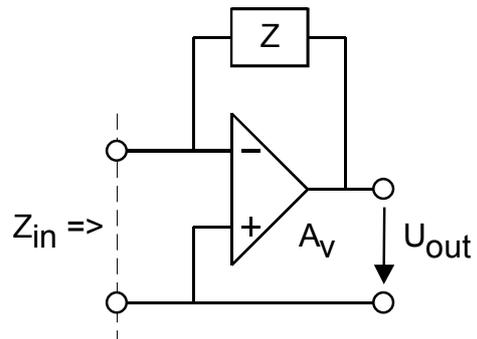
$R_1 = 30 \text{ K}\Omega$ , wie groß ist  $R_2$  ? (2P)

### 5.4 Negative Rückkopplung

( $\Sigma=2P$ )

Abbildung 5.4:

Operationsverstärker mit Rückkopplung auf den negativen Eingang



Der Operationsverstärker in Abb. 5.4 sei ideal bis auf eine endliche Verstärkung  $A_v$ . Wie groß ist die Eingangsimpedanz der gezeigten Schaltung ? (1P)

.....

Was muß passieren, damit der sogenannte „virtuelle Kurzschluß“ bei  $|Z|>0$  wirklich ein Kurzschluß - also  $0\Omega$  - ist ? (1P)

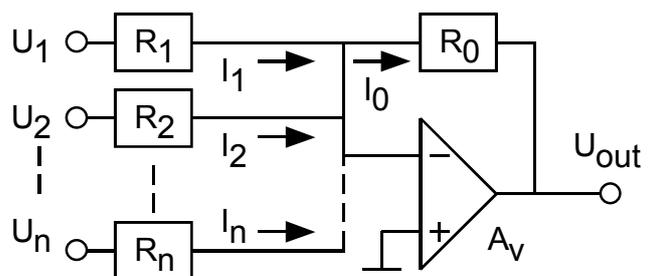
.....

### 5.5 Summierer

( $\Sigma=4P$ )

Abbildung 5.5:

Operationsverstärker als Summierer



Gegeben ist der Summierer in Abb. 5.5 mit  $A_v \rightarrow \infty$ , n Eingangsspannungen und n Eingangswiderständen  $R_k$ . Welche Eingangsimpedanz  $Z_k$  belastet die Spannungsquelle  $U_k$  ( $k=1...n$ ) ? (1P)

.....

Geben Sie die Formel für  $U_{out}$  als Funktion von  $U_1...U_n$  und  $R_0...R_n$  an. (3P)

.....

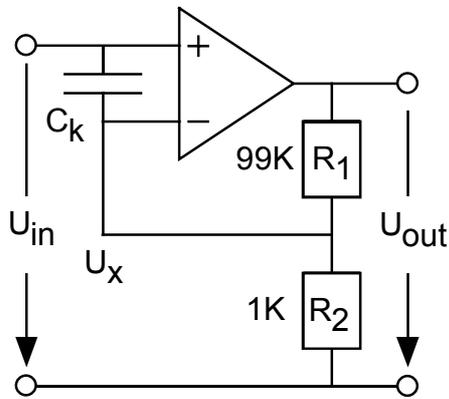
## 6 Kompensation

(Σ 15P)

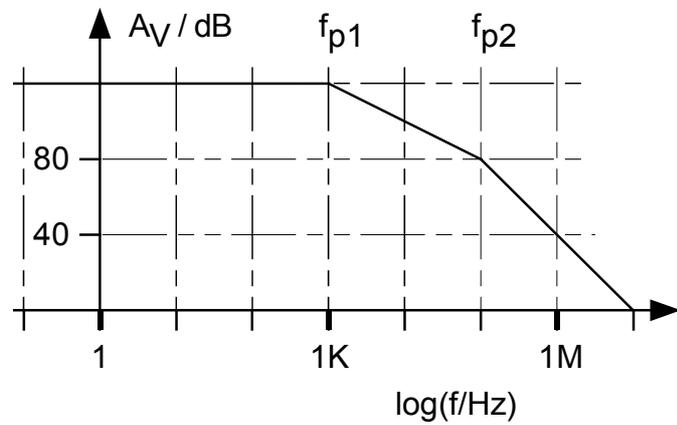
### 6.1 Durchführung der Kompensation

(Σ=5P)

(a)



(b)



**Abbildung 6:** (a) Verstärker mit OP und Kompensationskapazität C, (b) Amplitudengang

Abb. 6(b) zeigt die offene Schleifenverstärkung  $|A_V(f)|$  des Operationsverstärkers in Abb. 6(a). Aus Gründen der Stabilität wurde die Kompensationskapazität  $C_k$  eingebaut.

Kennzeichnen Sie in Abb. 6(b) durch einen Pfeil das entscheidende Kriterium, in welcher Frequenz die offene Schleifenverstärkung wie weit gedrückt werden muß, um dem System eine Phasenreserve von  $45^\circ$  zu verleihen. (1P)

Zeichnen Sie in Abb. 6(b) die offene Schleifenverstärkung des kompensierten Systems ein. (1P)

Ermitteln Sie aus der Graphik den neuen Pol  $f_{p1}^*$  des Systems mit Rückkopplungsnetzwerk. (1P)

.....

Berechnen Sie den effektiven Widerstand  $R_{k,eff}$  des Tiefpasses, der den neuen Pol verursacht (nachvollziehbare Formel und Wert). (1P)

.....

Berechnen Sie  $C_k$ . (1P)

.....

**6.2 Rückwirkung der Kapazität auf den Eingang (Σ=10P)**

Der Eingang ist nun durch die Kapazität  $C_k$  belastet. Berechnet werden soll die effektive Kapazität  $C_k^*$ , welche von der Quelle aus gemessen wird.

Die geschlossene Schleifenverstärkung  $A_v^*$  von  $U_{in}$  nach  $U_{out}$  ist

$$A_v^* = \frac{U_{out}}{U_{in}} = \frac{A_v}{1 + kA_v} .$$

Beachten Sie, daß in diesem Falle  $A_v$  positiv ist (Nicht-Invertierer!). Wie groß ist die geschlossene Schleifenverstärkung  $U_{in}$  nach  $U_x$ , also  $A_{vx}^* = U_{out}/U_x$ ? (Nur Formel) (2P)

.....

Für das interessierende Frequenzband sei  $A_v=100\text{dB}$  in Abb. 6(a). Berechnen Sie  $A_{vx}^*$ . (1P)

.....

Wie groß ist mit diesem  $A_v$  die effektive Kapazität  $C_k^*$ , welche von der Quelle aus gemessen wird? Gefragt sind Formel und Wert. (Ein möglicher Weg: Miller-Effekt) (2P)

.....

Die Kapazität  $C_k$  ist uns elektrisch und mechanisch zu groß. Durch Einbau eines weiteren Widerstandes  $R_{k2}$  läßt sie sich verringern. Zeichnen Sie in Abb. 6(a) ein, wo Sie diesen Widerstand einbauen. (1P)

Berechnen Sie  $R_{k2}$  so, daß die gleiche Wirkung, wie sie im Diagramm des Amplitudengangs in Abb. 6(b) gezeigt ist, mit einer Kompensationskapazität von 10 nF erzielt wird. (4P)

# 7 Rauschen

(Σ=8P)

Zur Aufnahme von Vogelstimmen richten Sie ein Mikrofon auf die weit entfernte Schallquelle. Sie stellen fest, daß aufgrund des Eigenrauschens des Mikrophons nur ein Signal-Rausch-Abstand von  $SNR_1 = P_{signal,1}/P_{noise,1} = 20dB$  erzielt wurde, obwohl Ihr Aufzeichnungsgerät mehr als 60 dB ermöglicht. (Der Index „signal“ steht für das empfangene Nutzsignal, der Index „noise“ kennzeichnet das Rauschsignal.)

Geben Sie die Verhältnisse der mittleren Spannungen  $U_{signal,1}/U_{noise,1}$  und der mittleren Signalleistungen  $SNR_1 = P_{signal,1}/P_{noise,1}$  als Faktor an (nicht in dB!).

(1P)

.....

(1P)

.....

Für die nächste Aufzeichnung fertigen Sie ein Array aus 10 x 10 gleichartigen Mikrofonen, welche so angeordnet sind, daß jedes die gleiche Signalinformation  $U_{signal,1}$  empfängt.

Geben Sie die Verhältnisse der mittleren Spannungen  $U_{signal,100}/U_{noise,100}$  als Funktion von  $U_{signal,1}/U_{noise,1}$  an (als Faktor nicht in dB).

(1P)

.....

Erzielte Verbesserung bei 100 Sensoren im Vergleich zu 1 Sensor in dB: .....

(1P)

Geben Sie die Verhältnisse der mittleren Signalleistungen  $P_{signal,100}/P_{noise,100}$  als Funktion von  $P_{signal,1}/P_{noise,1}$  an (als Faktor nicht in dB).

(1P)

.....

Erzielte Verbesserung bei 100 Sensoren im Vergleich zu 1 Sensor in dB: .....

(1P)

Um wie viel dB verbessert sich der Signal-Rausch-Abstand, wenn man von einem Mikrofon zu einem Array von m gleichartigen Mikrofonen übergeht?

(1P)

.....

Erzielte Verbesserung bei m Sensoren im Vergleich zu 1 Sensor in dB: .....

(1P)