

Laufende Nummer

<b>Fachhochschule Regensburg</b>	
<b>Fachbereich Elektrotechnik / Mikroelektronik</b>	
Prüfungsfach:	<b>Schaltungstechnik (SC), SS 1998</b>
Prüfungstermin:	21. Juli 1998      Studiengruppe: E5N
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:	_____ <u>M a r t i n   S C H U B E R T</u> _____
Vorname:	_____ <u>M U S T E R L Ö S U N G</u> 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: 94 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.

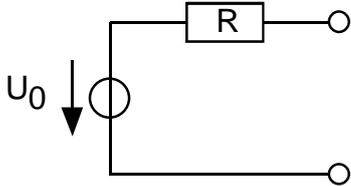
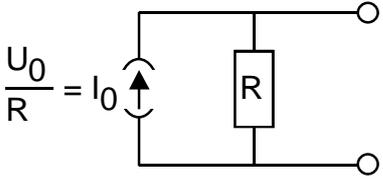
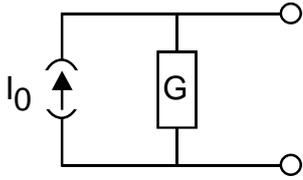
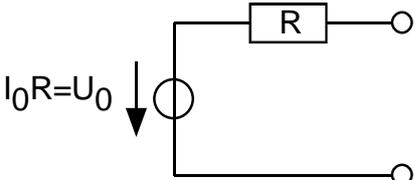
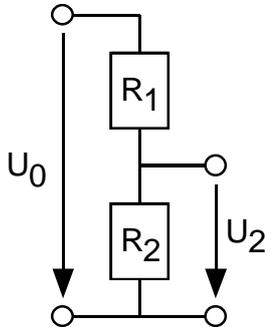
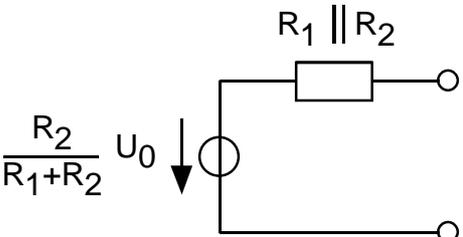
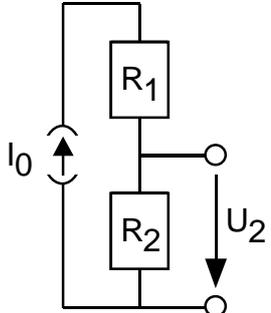
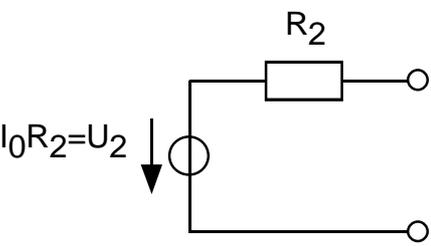
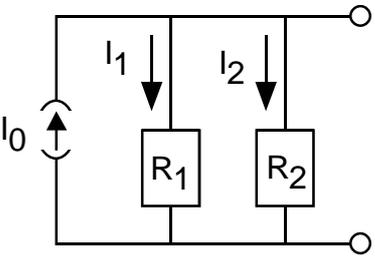
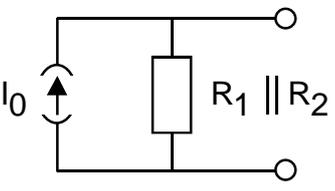
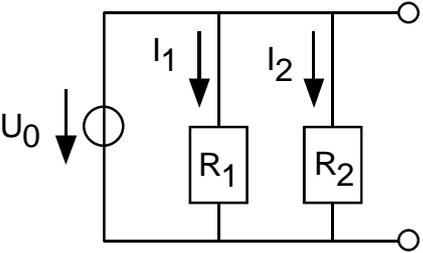
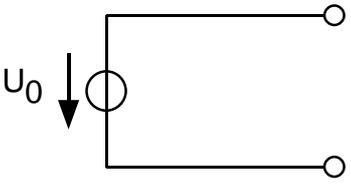
Kalkuliert wurde ein Zeitbedarf von ca. einem Punkt pro Minute. Verwenden Sie nicht zu viel Zeit für Aufgaben, die nur wenige Punkte bringen.

Hinweis zur Korrektur: „FF“ steht für Folgefehler.

# 1 Grundlagen

( $\Sigma=6P$ )

Formen Sie die gegebenen Schaltungen um in Quellen mit einem Widerstand:

	<p>Stromquelle:</p>  <p><math>\frac{U_0}{R} = I_0</math></p>	<p>(1P)</p>
	<p>Spannungsquelle:</p>  <p><math>I_0 R = U_0</math></p>	<p>(1P)</p>
	<p>Spannungsquelle:</p>  <p><math>\frac{R_2}{R_1 + R_2} U_0</math></p>	<p>(1P)</p>
	<p>Spannungsquelle:</p>  <p><math>I_0 R_2 = U_2</math></p>	<p>(1P)</p>
	<p>Stromquelle:</p> 	<p>(1P)</p>
	<p>Spannungsquelle:</p> 	<p>(1P)</p>

## 2 Kopplung von Verstärkerstufen

( $\Sigma=9P$ )

Die folgenden Bilder zeigen Verstärkerstufen. Wie bezeichnet man die Art der Auskopplung des Signales  $U_{out}$ ? Nennen Sie mindestens einen Vor- und Nachteil jeder dieser Techniken.

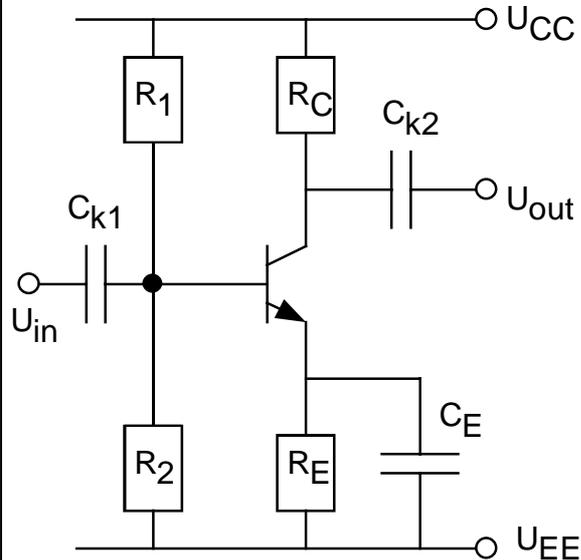
**Benennung:** kapazitiv

**Vorteile:**

- DC Arbeitspunkte beliebig einstellbar

**Nachteile:**

- Keine DC-Kopplung möglich
- Kleines  $AV \leq g_m R_C$
- Kleines  $\Delta U_C \leq U_{RC}$



(3P)

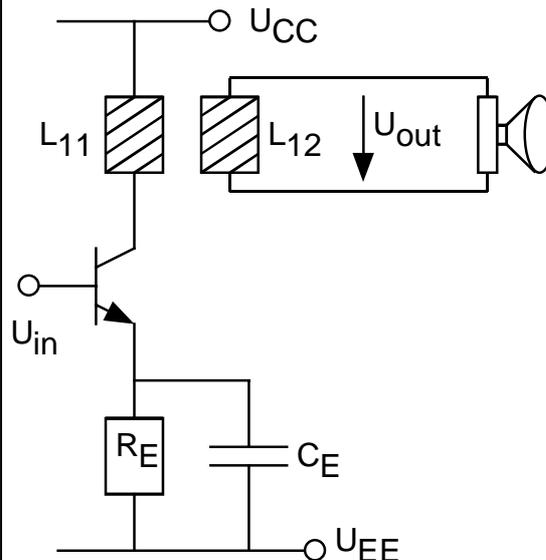
**Benennung:** induktiv

**Vorteile:**

- Gute Anpassung:  $U$  und  $Z$ , bes. induktive Lasten (Lautsprecher, Motoren).
- Galvanische Trennung der Stromkreise

**Nachteile:**

- Keine DC-Kopplung möglich
- Mechanisch sperrig und schwer (nicht „eisenlos“)



(3P)

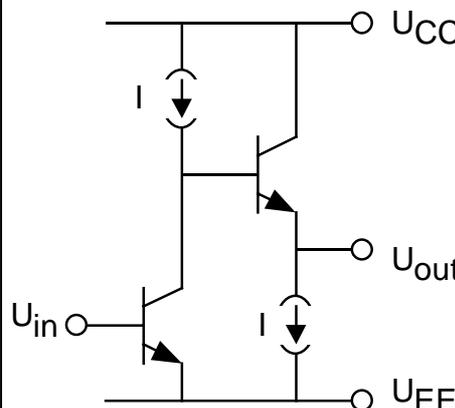
**Benennung:** galvanisch

**Vorteile:**

- DC-Kopplung möglich, kann ohne  $L, C$  (Chips!)
- Großes  $A_V \leq g_m r_{CE}$ .

**Nachteile:**

- Arbeitspunkteinstellung schwierig



(3P)

### 3 Die differentielle Eingangsstufe

(Σ=23P)

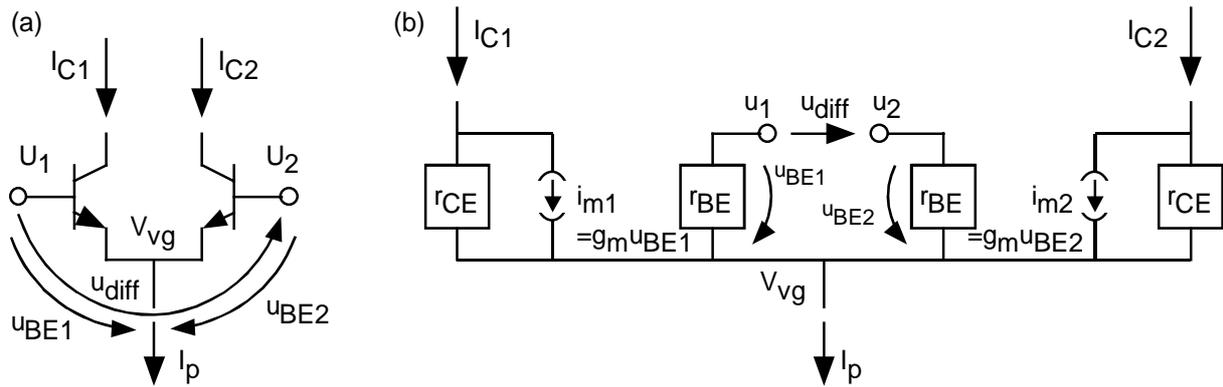


Abbildung 3.1: DC-Kleinsignal-Ersatzschaltbild einer bipolaren, differentiellen Eingangsstufe.

Bezeichnen Sie alle Pfeile in Bild 3.1(b) mit Bezeichnungen gemäß Bild 3.1(a). (1P)

Berechnen Sie jeweils Formel und Wert für  $I_p=2\text{mA}$ ,  $\beta=120$ ,  $u_T=25\text{mV}$ ,  $V_A=100\text{V}$

Berechnen Sie die Kollektor-Ströme im Arbeitspunkt, i.e.  $I_{C1a}$  und  $I_{C2a}$ : (1P)

.....  $I_{Ca} = I_{C1a} = I_{C2a} = I_p / 2 = 1\text{mA}$  .....

Zeigen Sie, daß der Übertragungsleitwert der Transistoren gegeben ist mit  $g_m=g_{m1}=g_{m2}=40\text{mS}$  (1P)

.....  $g_m = g_{m1} = g_{m2} = I_{Cxa} / u_T = 1\text{mA} / 25\text{mV} = 40\text{mS}$  .....

Berechnen Sie die Eingangswiderstände der Transistoren, i.e.  $r_{BE}$ : (1P)

.....  $r_{BE} = r_{BE1} = r_{BE2} = \beta / g_m = 120 / 40\text{mS} = 3\text{K}\Omega$  .....

Berechnen Sie die Ausgangswiderstände der Transistoren, i.e.  $r_{CE}$ : (1P)

.....  $r_{CE} = r_{CE1} = r_{CE2} = V_A / I_C = 100\text{V} / 1\text{mA} = 100\text{K}\Omega$  .....

Geben Sie erstens  $U_{diff}$  und zweitens das Gleichtaktsignal (common mode signal)  $U_{cm}$  als Funktion von  $U_1$ ,  $U_2$  an. (Nur Formel) (1P)

.....  $U_{diff} = U_1 - U_2$  , .....  $U_{cm} = (U_1 + U_2) / 2$  .....

Die in Abb. 3.1 gezeigte differentielle Stufe arbeite im Eingang eines Operationsverstärkers (OP) mit einer Spannungsverstärkung von  $|A_V|=100\text{dB}$ . Am Ausgang des OPs messen wir ein sinusförmiges Signal mit einer Amplitude von  $\hat{u}_{\text{out}}=5\text{V}$ . Wie groß ist die Amplitude  $\hat{u}_{\text{diff}}$  am Eingang? (Formel und Wert) (1P)

$$\dots \hat{u}_{\text{diff}} = \hat{u}_{\text{out}} / A_V = 5\text{V} / 10^5 = 50\mu\text{V} \dots$$

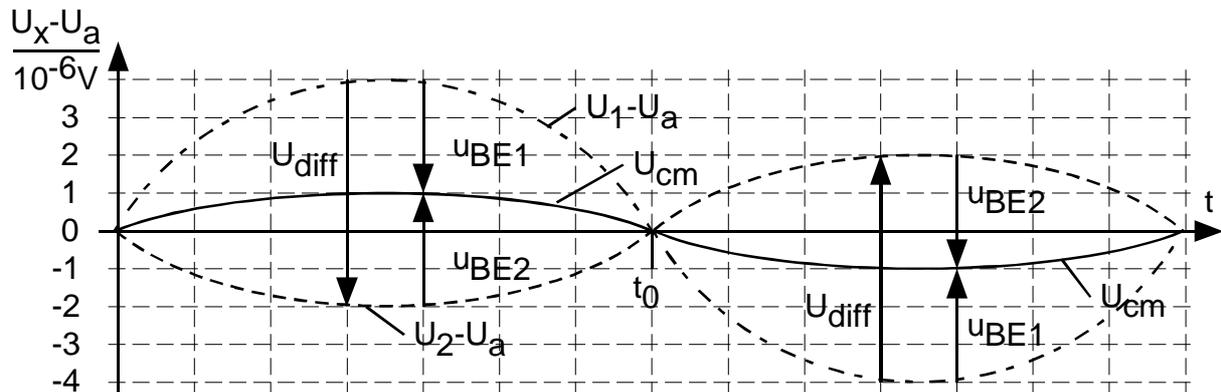


Abbildung 3.2: Die Eingangsspannungen  $U_1$  und  $U_2$  schwingen um den Arbeitspunkt  $U_a$ .

Abb. 3.2 zeigt ein Beispiel für die Signale  $U_1$  und  $U_2$ . Zeichnen Sie  $U_{\text{cm}}(t)$  als Linie ein. (1P)

Zeichnen Sie in Abb. 3.2  $U_{\text{diff}}$ ,  $U_{\text{BE1}}$ ,  $U_{\text{BE2}}$  einmal für  $t < t_0$  und einmal für  $t > t_0$  als Pfeile ein. (2P)

Drücken Sie  $u_{\text{BE1}}$  und  $u_{\text{BE2}}$  als Funktion von  $u_{\text{diff}}$  aus (nur Formel) (1P)

$$\dots u_{\text{BE1}} = -u_{\text{BE2}} = u_{\text{diff}} / 2 \dots$$

Für den gesamten OP gelte weiterhin  $|A_V|=100\text{dB}$ . Wie groß ist die Amplitude  $\hat{u}_{\text{out}}$  am Ausgang des OPs, der gemäß Abb. 3.2 angesteuert wird? (Formel und Wert?) (1P)

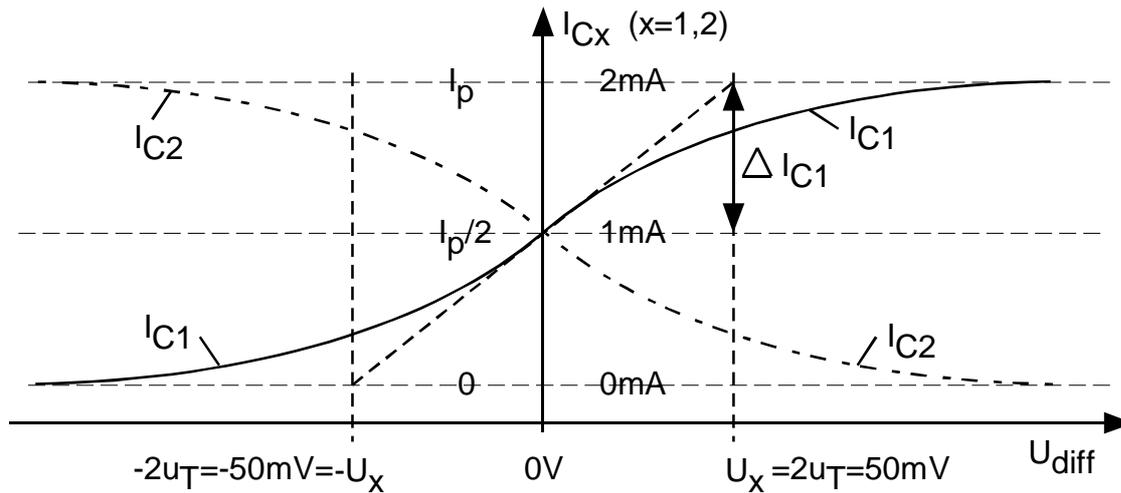
$$\dots \hat{u}_{\text{out}} = A_V \hat{u}_{\text{diff}} = 10^5 \cdot 6\mu\text{V} = 600\text{mV} \dots$$

Berechnen Sie den Kleinsignalstrom  $i_{\text{m1}}$  in Abb. 3.1(b) für  $u_{\text{diff}}=0,2\text{mV}$ . (Formel und Wert) (1P)

$$\dots i_{\text{m1}} = g_m u_{\text{BE1}} = g_m u_{\text{diff}} / 2 = 40\text{mS} \cdot 0,2\text{V} / 2 = 4\mu\text{A} \dots$$

Berechnen Sie den Kleinsignalstrom  $i_{\text{m2}}$  in Abb. 3.1 für  $u_{\text{diff}}=0,2\text{mV}$ . (Formel und Wert) (1P)

$$\dots i_{\text{m2}} = g_m u_{\text{BE2}} = -g_m u_{\text{diff}} / 2 = -40\text{mS} \cdot 0,2\text{mV} / 2 = -4\mu\text{A} \dots$$



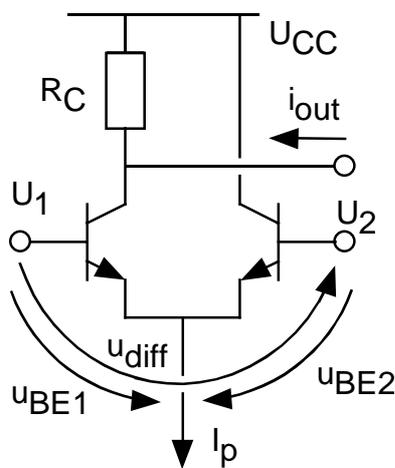
**Abbildung 3.3:** Großsignalverhalten der Ausgangsströme  $I_{C1}$  und  $I_{C2}$ .

Abbildung 3.3 soll das Großsignalverhalten der Ströme  $I_{C1}$  und  $I_{C2}$  um  $u_{diff}=0$  zeigen. Zeichnen sie den zweiten Kollektorstrom in die Abbildung 3.3 ein und bezeichnen Sie die entsprechenden Linien mit  $I_{C1}$  und  $I_{C2}$ . (2P)

Abbildung 3.3 zeigt drei horizontale, gestrichelte Linien parallel zur Abszisse („x-Achse“). Schreiben Sie die Stromwerte an die Ordinate („y-Achse“) bei welchen diese von den horizontalen Linien geschnitten wird. (1P)

Abbildung 3.3 zeigt eine Tangente an einen Kollektorstrom, deren Schnittpunkte mit dem minimalen und maximalen Strom zu den Werten  $-U_x$  und  $U_x$  führen. Berechnen Sie  $U_x$ . (Formel und Wert) (3P)

$$\Delta I_{C1} = g_{m1} U_{BE1} = 0,5 g_{m1} U_x \quad \Rightarrow \quad U_x = \frac{\Delta I_{C1}}{0,5 g_{m1}} = \frac{\Delta I_{C1}}{0,5 \cdot (\Delta I_{C1} / u_T)} = 2 u_T = 2 \cdot 25mV = 50mV$$



**Abbildung 3.4:** differentielle Verstärkerstufe

Abbildung 3.4 zeigt einen differentiellen Verstärker mit (1P) einem Arbeitswiderstand  $R_C$ . Es sei weiterhin  $I_p=2mA$ . Wie groß ist der gesamte Übertragungsleitwert  $G_m=i_{out}/u_{diff}$  der Stufe (Formel und Wert).

$$G_m = 0,5 \cdot g_{m1} = 20mS$$

Schreiben Sie die Exakte Formel für die (1P) Ausgangsimpedanz  $Z_2$  und machen Sie dann die übliche Näherung für diese Situation (nur Formel).

$$Z_2 = R_C || r_{CE1} \cong R_C$$

Welche Spannungsverstärkung hat diese Stufe für (1P)  $R_C=5K\Omega$ ?

$$-A_v = G_m Z_2 \cong 20mS \cdot 5K\Omega = 100$$

## 4 Operationsverstärker

( $\Sigma=10P$ )

Abbildung 4.1

Idealer Operationsverstärker (OP) mit Beschaltung.

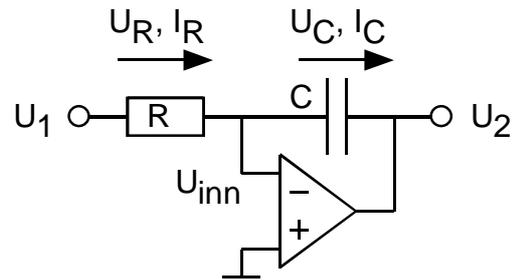


Abb. 4.1 zeigt einen idealen Operationsverstärker (OP), der mit zwei passiven Bauelementen beschaltet ist. Berechnen Sie den Strom  $I_R$  durch den Widerstand  $R$  (Formel). (1P)

$$I_R = \frac{U_1 - U_{inn}}{R} = \frac{U_1}{R}$$

Berechnen Sie den Strom  $I_C$  durch die Kapazität  $C$  als Funktion von  $U_1$  und  $R$ . (1P)

$$I_C = I_R = U_1 / R$$

Berechnen Sie die Spannung  $U_C(t)$  als Funktion von  $U_1(t)$ . (1P)

$$U_C(t) = \frac{1}{C} I_C dt + U_{C0} = \frac{1}{C} \frac{U_1}{R} dt + U_{C0} = \frac{1}{RC} U_1 dt + U_{C0}$$

Berechnen Sie die Spannung  $U_2(t)$  als Funktion von  $U_1(t)$ . (1P)

$$U_2(t) = -U_C(t) = -\frac{1}{RC} U_1 dt - U_{C0}$$

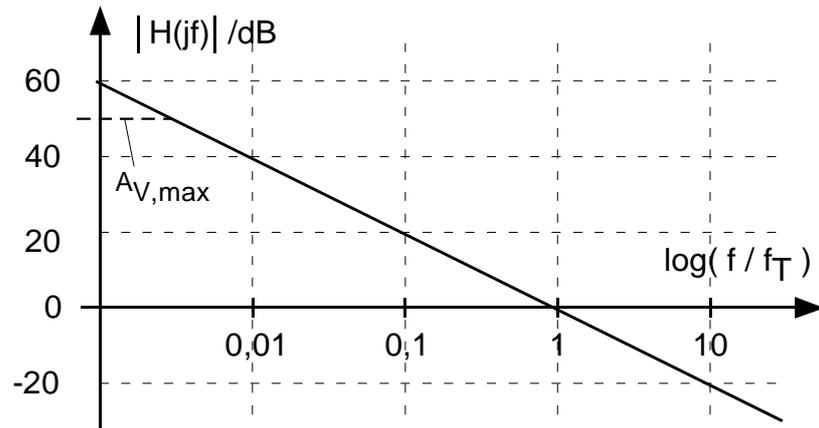
Berechnen sie die Übertragungsfunktion  $H(s)=U_2(s)/U_1(s)$  im Laplace-Bereich (1P)

$$H(s) = -\frac{Z_2(s)}{Z_1(s)} = -\frac{1/sC}{R} = -\frac{1}{sRC}, \quad \text{wenn } s = j\omega: \quad H(s) = -\frac{1}{j\omega RC} = j \frac{1}{\omega RC}$$

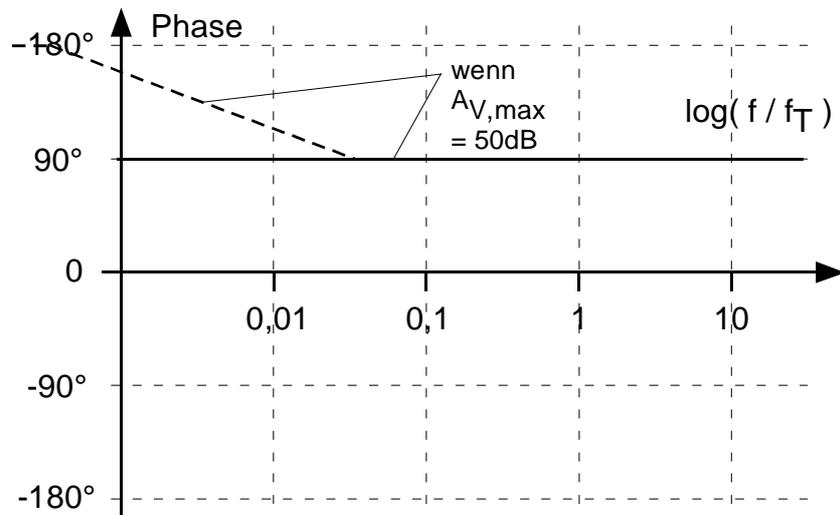
Setzen Sie  $s=j\omega$  und berechnen sie die Transitfrequenz  $f_T$  dieser Baugruppe (1P)

$$H(j\omega) = -\frac{1}{j\omega RC} = j \frac{1}{\omega RC} \Rightarrow |H(jf_T)| = 1 = \left| j \frac{1}{2\pi f_T RC} \right| = \frac{1}{2\pi f_T RC} \Rightarrow f_T = \frac{1}{2\pi RC}$$

(a) Amplitudengang



(b) Phasengang



**Abbildung 4.2:**

Bode-Diagramm der  
Schaltung in Abb. 4.1

Tragen Sie in das Bode-Diagramm in Abb. 4.2 den Amplitudengang der Schaltung in Abb. 4.1 ein. (2P)

Zeichnen Sie in Abb. 4.2 gestrichelt die Situation für den Fall ein, in welchem der Amplitudengang des Operationsverstärkers auf eine maximale Leerlaufverstärkung von  $A_{V,max}=50\text{dB}$  begrenzt ist. (1P)

Zeichnen Sie in Abb. 4.2(b) den Phasengang für die Schaltung in Abb. 4.1 mit idealem OP ein. (1P)

## 5 Kompensation

(Σ=9P)

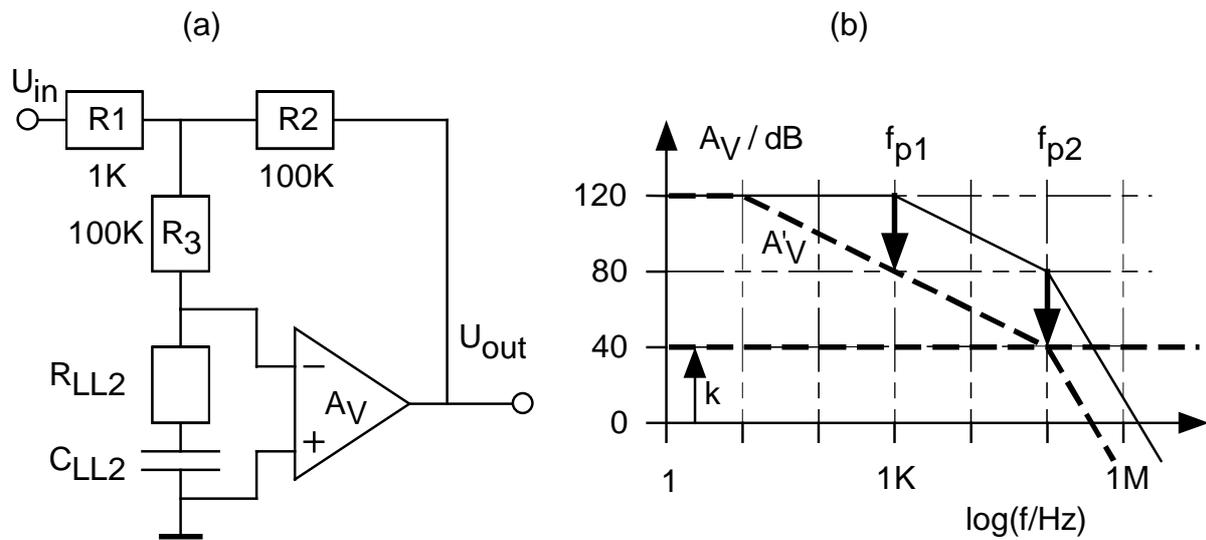


Abbildung 5.1: (a) OP mit Eingangskompensation, (b) Verstärkung des unbeschalteten OP

Welche Verstärkung hat die Schaltung in Abb. 5.1(a) für niedrige Frequenzen? (1P)

$$A_V = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{100\text{K}\Omega}{1\text{K}\Omega} = -100$$

Verdeutlichen Sie durch Einzeichnen einer Linie in Abb. 5.1(b) die offene Schleifenverstärkung  $kA_V$ . (1P)

Kompensiert wird die Schaltung in Abb. 5.1 durch ein Lead-Lag-Glied vor dem Eingang des OP. Kennzeichnen sie durch einen Pfeil in Abb. 5.1(b), welche Dämpfung  $d$  das LL-Glied bei Frequenzen  $f \gg f_{p2}$  aufweisen muß und benennen sie diese in dB: (1P)

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

Berechnen sie mit oben errechnetem Ergebnis  $R_{LL2}$  in Abb. 5.1(a). (3P)

$$R_{LL1} = (R_1 \parallel R_2) + R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3 = 0,99\text{K}\Omega + 100\text{K}\Omega = 100,99\text{K}\Omega \cong 101\text{K}\Omega$$

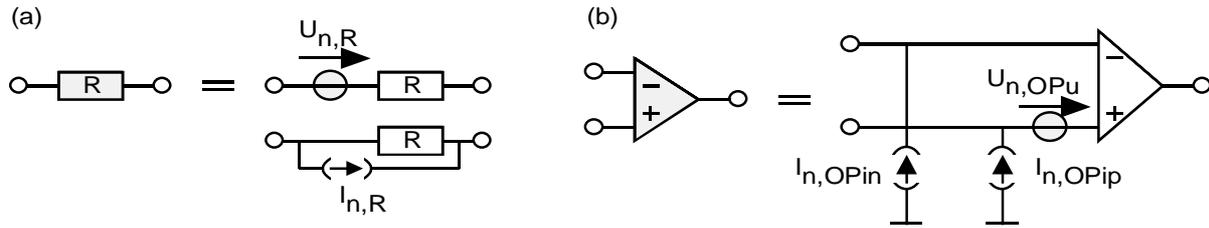
$$d = \frac{R_{LL2}}{R_{LL1} + R_{LL2}} = \frac{1}{100} \Rightarrow R_{LL2} = \frac{d}{1-d} \cdot R_{LL1} = \frac{0,01}{1-0,01} \cdot 101\text{K}\Omega \cong 1,02\text{K}\Omega$$

Bei welcher Frequenz muß die Nullstelle des LL-Gliedes liegen und welchen Wert für die Kapazität  $C_{LL2}$  benötigt man dafür? (3P)

$$f_{p1} = f_{LL0} = \frac{1}{2\pi R_{LL2} C_{LL2}} \Rightarrow C_{LL2} = \frac{1}{2\pi R_{LL2} f_{p1}} = \frac{1}{2\pi \cdot 1,02\text{K}\Omega \cdot 1\text{KHz}} = 156\text{nF}$$

## 6 Rauschen

(Σ=26P)



**Abbildung 6.1:**

- (a) Umwandlung eines rauschenden Widerstandes in einen rauschfreien Widerstand und eine Rauschspannungsquelle oder Rauschstromquelle, und
- (b) Umwandlung eines rauschenden OPs in einen rauschfreien OP sowie eine Rauschspannungsquelle und zwei Rauschstromquellen an dessen Eingang.

Abb. 6.1 illustriert die Umwandlung eines rauschenden Widerstandes und eines rauschenden OP in rauschfreie Bauelemente mit externen Rauschquellen.

Das thermische Rauschen (Johnson Noise) für einen Widerstand gemäß Abb. 6.1(a) kann dargestellt werden als  $U_{n,R} = U_{n,1\Omega,1Hz} \sqrt{RB}$ . Zeigen sie, daß  $U_{n,1\Omega,1Hz} = 129 \text{ pV} / \sqrt{\Omega \text{ Hz}}$  für  $T=300\text{K}$ . Dabei werden R in  $\Omega$  und B in Hz berechnet. Es ist  $k=1,38 \cdot 10^{-23} \text{ VA s/K}$ . (1P)

$$U_{n,R} = \sqrt{4kTRB} = \sqrt{4kT} \cdot \sqrt{RB} = U_{n,1\Omega,1Hz} \cdot \sqrt{RB}$$

$$U_{n,1\Omega,1Hz} = \sqrt{4kT} = \sqrt{4 \cdot 300\text{K} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ VA s/K}} = 129 \text{ pV} / \sqrt{\Omega \text{ Hz}}$$

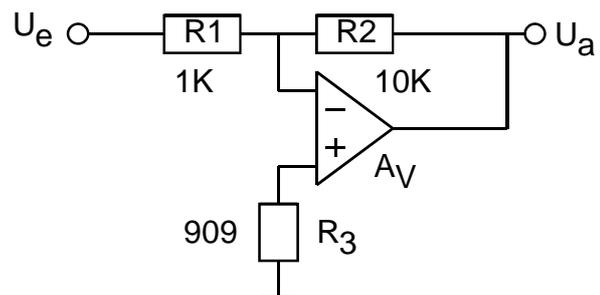
Wandeln Sie die Rauschspannungsquelle in eine Rauschstromquelle um. Berechnen Sie (1) den Strom  $I_{n,R}$  gemäß Abb. 6.1(a) als  $f(k,T,B,R)$  und (2) den Faktor  $I_{n,1\Omega,1Hz}$  in der Formel  $I_{n,R} = I_{n,1\Omega,1Hz} \sqrt{B/R}$  (Formel und Wert, physikalische Dimension nicht vergessen.) (3P)

$$(1) \quad I_{n,R} = \frac{U_{n,R}}{R} I_{n,1\Omega,1Hz} = \sqrt{4kTB/R} = \sqrt{4kT} \sqrt{B/R} = 129 \text{ pA} \sqrt{\Omega / \text{Hz}}$$

$$(2) \quad I_{n,1\Omega,1Hz} = 129 \text{ pA} \sqrt{\Omega / \text{Hz}}$$

**Abbildung 6.2:**

Operationsverstärker beschaltet als Invertierer. Es wird eine sehr hohe Verstärkung  $A_V$  des OP vorausgesetzt.



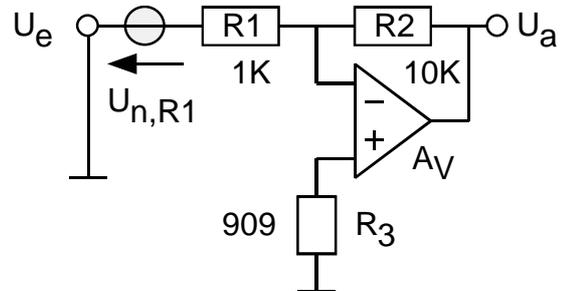
Bei OPs mit bipolarem Eingang schaltet man einen Widerstand vor den positiven Eingang, z.B. den Widerstand  $R_3$  in Abb. 6.2. Warum macht man das und wie berechnet sich  $R_3$ ? (2P)

Kompensation des DC-Offset-Stromes

$$R_3 = R_1 || R_2$$

**Abbildung 6.3:**

Wirkung des Rauschens des Widerstandes  $R_1$  auf den Ausgang  $U_a$ .



Berechnen Sie die effektive thermische Rauschspannung  $U_{n,R1}$  des Widerstandes  $R_1$  für  $B=10\text{KHz}$ . (1P)

$$U_{n,R1} = U_{n,1\Omega,1\text{Hz}} \sqrt{R_1 B / \Omega\text{Hz}} = 129\text{pV} \cdot \sqrt{1\text{K}\Omega \cdot 10\text{KHz} / \Omega\text{Hz}} = 0,408\mu\text{V}$$

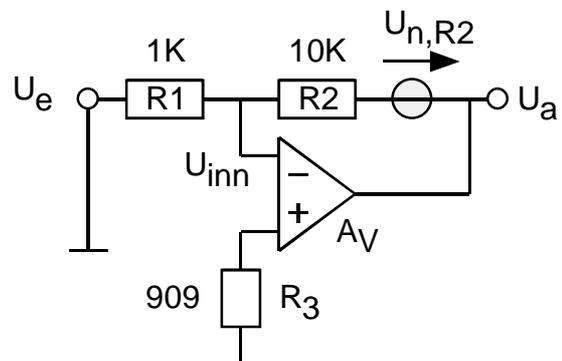
Berechnen sie gemäß Abb. 6.3 die Wirkung des Rauschens des Widerstandes  $R_1$  auf den Ausgang, also den Rauschspannungsbeitrag  $U_{n,a,R1}$ . Begründen Sie ihr Vorgehen kurz verbal. (2P)

$$U_{n,a,R1} = -\frac{R_2}{R_1} \cdot U_{n,R1} = -10 \cdot 0,408\mu\text{V} = -4,08\mu\text{V}$$

$U_{n,R1}$  addiert sich zum Eingangssignal  $U_e$  und wird wie dieses verstärkt.

**Abbildung 6.4:**

Wirkung des Rauschens des Widerstandes  $R_2$  auf den Ausgang  $U_a$ .



Berechnen Sie die effektive therm. Rauschspannung  $U_{n,R2}$  des Widerstandes  $R_2$  für  $B=10\text{KHz}$ . (1P)

$$U_{n,R2} = U_{n,1\Omega,1\text{Hz}} \sqrt{R_2 B / \Omega\text{Hz}} = 129\text{pV} \cdot \sqrt{10\text{K}\Omega \cdot 10\text{KHz} / \Omega\text{Hz}} = 1,29\mu\text{V}$$

Berechnen Sie gemäß Abb. 6.4 die Wirkung des Rauschens des Widerstandes  $R_2$  auf den Ausgang, also den Rauschspannungsbeitrag  $U_{n,a,R2}$ . Begründen Sie ihre Rechnung entweder kurz verbal oder durch Aufstellen von Gleichungen. (2P)

$$U_{n,a,R2} = -U_{n,R2} = -1,29\mu\text{V}$$

Verbale Begründung: Ströme und Spannungen innerhalb der Schaltung bleiben unverändert. Daher muß  $U_{n,R2}$  durch die Ausgangsspannung ausgeglichen werden.

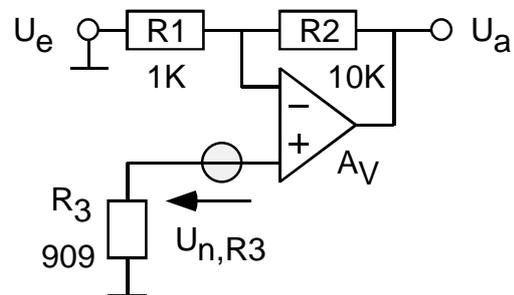
Gleichungen:

$$U_{n,e}=0 \quad \rightarrow \quad I_{n,R1}=0 \quad \rightarrow \quad I_{n,R2}=I_{n,R1}=0$$

$$U_{n,a} = U_{inn} - I_{n,R2} \cdot R_2 - U_{n,R2} = 0 - 0 - U_{n,R2} = - U_{n,R2}$$

**Abbildung 6.5:**

Wirkung des Rauschens des Widerstandes  $R_3$  auf den Ausgang  $U_a$ .



Berechnen Sie die effektive therm. Rauschspannung  $U_{n,R3}$  des Widerstandes  $R_3$  für  $B=10\text{KHz}$ . (1P)

$$U_{n,R3} = U_{n,1\Omega,1\text{Hz}} \sqrt{R_3 B / \Omega\text{Hz}} = 129\text{pV} \cdot \sqrt{909\Omega \cdot 10\text{KHz} / \Omega\text{Hz}} = 0,389\mu\text{V}$$

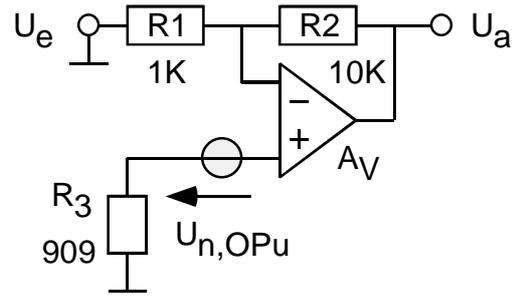
Berechnen Sie gemäß Abb. 6.5 die Wirkung des Rauschens des Widerstandes  $R_3$  auf den Ausgang, also den Rauschspannungsbeitrag  $U_{n,a,R3}$ . Begründen Sie ihre Rechnung entweder kurz verbal oder durch Aufstellen von Gleichungen. (2P)

$$U_{n,a,R3} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} U_{n,R3} = \frac{10+1}{1} \cdot 0,389\mu\text{V} = 4,28\mu\text{V}$$

Verbale Begründung:  $U_{n,R3}$  betreibt den OP als Nicht-Invertierer

**Abbildung 6.6:**

Wirkung der äquivalenten Eingangsräuschspannung  $U_{n,OPu}$  des OPs auf den Ausgang  $U_a$ .



Gegeben ist für den bipolaren OP027 von Analog Devices  $U_{n,OP,1Hz} = 3,0nV / \sqrt{Hz}$ . Berechnen Sie die effektive Rauschspannung  $U_{n,OPu}$  gemäß Abb. 6.6 für  $B=10KHz$ . (1P)

$$U_{n,OPu} = U_{n,OP,1Hz} \cdot \sqrt{B / Hz} = 3nV \cdot \sqrt{10KHz / Hz} = 0,3\mu V$$

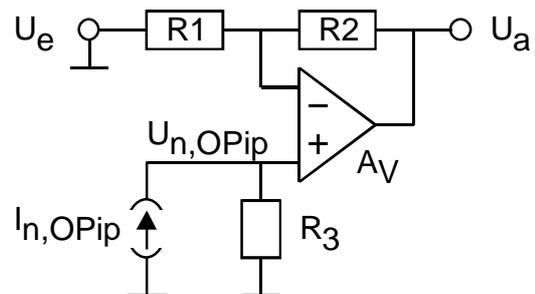
Berechnen Sie gemäß Abb. 6.6 die Wirkung des äquivalenten Eingangsräuschens  $U_{n,OPu}$  des OPs auf den Ausgang, also den Rauschspannungsbeitrag  $U_{n,a,OPu}$ . Begründen Sie ihre Rechnung entweder kurz verbal oder durch Aufstellen von Gleichungen. (2P)

$$U_{n,a,OPu} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} U_{n,OP} = \frac{10 + 1}{1} \cdot 0,3\mu V = 3,30\mu V$$

Verbale Begründung:  $U_{n,OPu}$  betreibt den OP als Nicht-Invertierer

**Abbildung 6.7:**

Wirkung des Rauschens des äquivalenten Eingangsräuschstromes  $I_{n,OPip}$  auf den Ausgang  $U_a$ .



Gegeben ist für den bipolaren OP027 von Analog Devices  $I_{n,OP,1Hz} = 0,4pA / \sqrt{Hz}$  für beide Eingänge. Berechnen Sie die effektive Rauschspannung  $U_{n,OPip}$  für  $B=10KHz$  gemäß Abb. 6.7, die auf den positiven Eingang des OPs wirkt. (1P)

$$U_{n,OPip} = I_{n,OP,1Hz} \cdot \sqrt{B / Hz} \cdot R_3 = 0,4pA \cdot \sqrt{10KHz / Hz} \cdot 909\Omega = 36,4nV$$

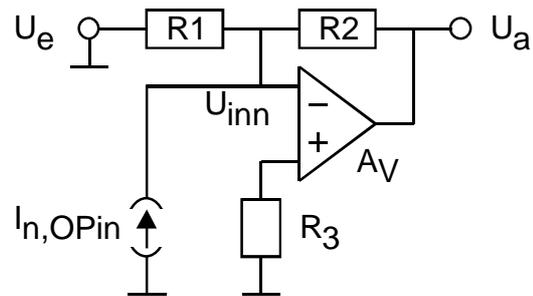
Berechnen Sie gemäß Abb. 6.7 die Wirkung des äquivalenten Eingangsräuschstromes  $I_{n,OPip}$  des OPs auf den Ausgang, also den Rauschspannungsbeitrag  $U_{n,a,OPip}$ . Begründen Sie ihre Rechnung entweder kurz verbal oder durch Aufstellen von Gleichungen. (2P)

$$U_{n,a,OPip} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} U_{n,OPip} = \frac{10+1}{1} \cdot 36,4nV = 0,400\mu V$$

Verbale Begründung:  $U_{n,OPip}$  betreibt den OP als Nicht-Invertierer

**Abbildung 6.8:**

Wirkung des Rauschens des äquivalenten Eingangsrauschstromes  $I_{n,OPin}$  auf den Ausgang  $U_a$ .



Gegeben ist für den bipolaren OP OP027 von Analog Devices  $I_{n,OP,1Hz} = 0,4pA / \sqrt{Hz}$  für beide Eingänge. Berechnen Sie den effektiven Rauschstrom  $I_{n,OPin}$  für  $B=10KHz$ , der gemäß Abb. 6.8 am invertierenden Eingang des OPs eingespeist wird. (1P)

$$I_{n,OPin} = I_{n,OP,1Hz} \cdot \sqrt{B / Hz} = 0,4pA \cdot \sqrt{10KHz / Hz} = 40pA$$

Berechnen Sie gemäß Abb. 6.8 die Wirkung des äquivalenten Eingangsrauschstromes  $I_{n,OPin}$  des OPs auf den Ausgang, also den Rauschspannungsbeitrag  $U_{n,a,OPin}$ . Begründen Sie ihre Rechnung entweder kurz verbal oder durch Aufstellen von Gleichungen. (2P)

$$U_{n,a,OPin} = -R_2 \cdot I_{n,OPin} = -10K\Omega \cdot 40pA = -0,4\mu V$$

Verbale Begründung:  $I_{n,OPin}$  kann nur über  $R_2$  abfließen, da  $U_{inn}$  per Rückkopplung konstant gehalten wird.

Berechnen Sie die gesamte effektive Ausgangsrauschspannung  $U_{n,a}$  der Schaltung. (2P)

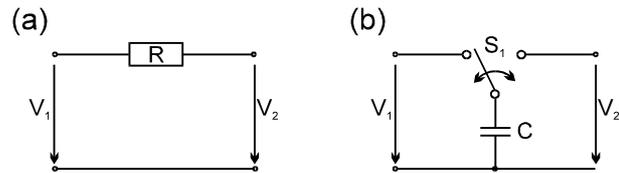
$$\begin{aligned} U_{n,a}^2 &= U_{n,a,R1}^2 + U_{n,a,R2}^2 + U_{n,a,R3}^2 + U_{n,a,OPu}^2 + U_{n,a,OPip}^2 + U_{n,a,OPin}^2 \\ &= (4,08^2 + 1,29^2 + 4,28^2 + 3,30^2 + 0,40^2 + 0,40^2)\mu V^2 = 47,84\mu V^2 \\ U_{n,a} &= 6,92\mu V \end{aligned}$$

## 7 Geschaltete Kapazitäten

(Σ=10P)

Abbildung 7.1:

- (a) Widerstand und
- (b) geschaltete Kapazität



Der Schalter in Abb. 7.1(b) kippt aus der linken Position in die rechte Position und zurück in die linke Position. Wie groß ist die Ladung  $\Delta Q_C$ , die er bei diesem Vorgang von links nach rechts transportiert hat? (1P)

$$\Delta Q_C = C(V_1 - V_2)$$

Der Schalter in Abb. 7.1(b) arbeite mit einer Frequenz  $f$ . Wie groß ist der mittlere Strom  $\bar{I}_C$ , der von links nach rechts transportiert wird? (1P)

$$\bar{I}_C = f \cdot \Delta Q_C = fC(V_1 - V_2)$$

Wie groß muß der Widerstand in Abb. 7.1(a) gewählt werden, damit der Strom durch den Widerstand gleich dem mittleren Strom durch die geschaltete Kapazität ist, also damit  $I_R = \bar{I}_C$ ? (1P)

$$\bar{I}_C = fC(V_1 - V_2) = I_R = (V_1 - V_2) / R \quad \rightarrow \quad R = 1 / fC$$

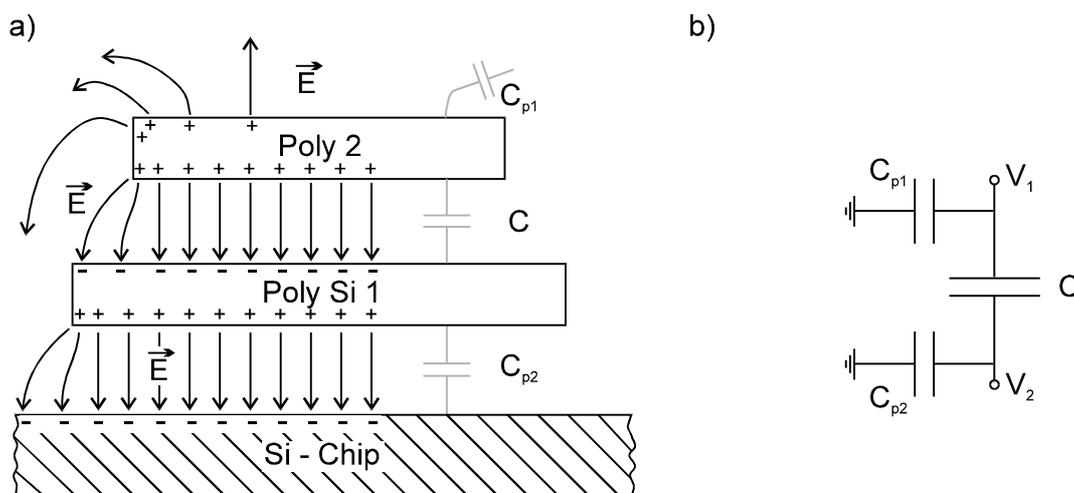


Abbildung 7.2: (a) Eine „on Chip“ realisierte Kapazität ist gemäß (b) nicht ohne parasitäre Kapazitäten herstellbar.

Betrachten Sie den Querschnitt einer Kapazität, wie sie „on Chip“ realisiert wird, in Abb. 7.2(a). Sie ist mit zwei Parasiten beaufschlagt:  $C_{p1}$  und  $C_{p2}$ . Aus dem Verlauf der elektrischen Feldlinien wird klar, daß einer der Parasiten wesentlich größer ist, als der andere: (1P)

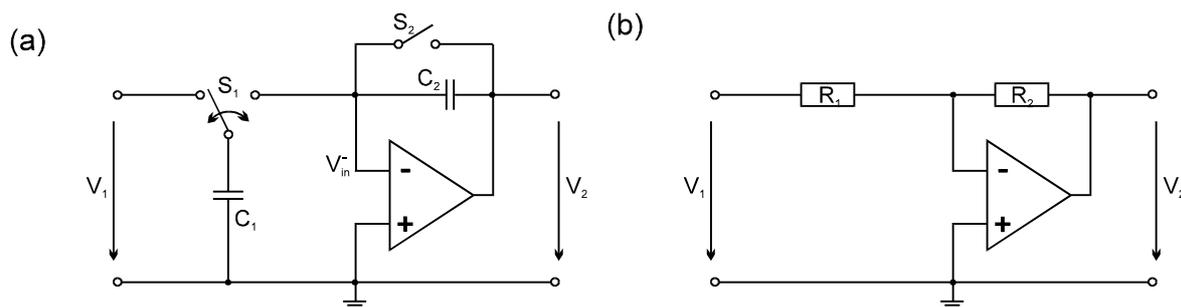
$$C_{p2} \gg C_{p1}$$

Wie muß die Kapazität  $C_1$  in Abb. 7.3(a) eingebaut werden, damit die parasitären Kapazitäten  $C_{p1}$  und  $C_{p2}$  die gewünschte Funktionalität so wenig wie möglich verfälschen? (1P)

$$C_{1,p1} \ll C_{1,p2}, \text{ daher: } C_{1,p1} \text{ an den Schalter, } C_{1,p2} \text{ gegen Masse}$$

Bedenken sie die Spannungsänderungen an den Anschlüssen der Kapazität  $C_2$  in Abb. 7.3(a) und die mit ihr verbundenen Parasiten  $C_{2,p1}$ ,  $C_{2,p2}$ . Wie schließt man die Kapazität  $C_2$  so an, daß der Ausgang des OPs möglichst wenig Blindleistung erbringen muß? (1P)

$$C_{2,p1} \text{ an den Ausgang des OP, } C_{2,p2} \text{ an virtuelle Masse}$$



**Abbildung 7.3:** Verstärker (a) mit geschalteten Kapazitäten, (b) mit Widerständen

Der Schalter  $S_2$  in Abb. 7.3(a) bleibt geöffnet. Welche Funktion hat die Baugruppe? (1P)

Integrator

Die Schaltung in Abb. 7.3(a) und soll die gleiche Funktion erfüllen, wie die Schaltung in Abb. 7.3(b). Wie muß der Schalter  $S_2$  arbeiten? (1P)

$$U_{\text{Schalter},2} = 0 \text{ während } S_1 \text{ in linker Position, sonst } I_{\text{Schalter},2} = 0$$

Es sei  $R_2 = 4R_1 = 4K\Omega$  und  $C_2 = 50fF$ . Wie groß muß  $C_1$  gewählt werden, damit die Schaltungen in den Abb. 7.3(a) und (b) die gleiche Verstärkung aufweisen? (Formel und Wert) (2P)

$$A_v = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{C_1}{C_2} \rightarrow C_1 = C_2 \frac{R_2}{R_1} = 50fF \frac{4K\Omega}{1K\Omega} = 0,2pF$$