

Fachhochschule Regensburg		Nr.: _____
Fachbereich Elektrotechnik / Mikroelektronik		
Prüfungsfach:	Schaltungstechnik (SC), SS 1996	
Prüfungstermin:	16.07.1996	
Prüfungsdauer:	90 Minuten (Planmäßig: 10.45 - 12.15 Uhr)	
Zugelassene Hilfsmittel:	Formelsammlung	
Aufgabensteller:	Prof. Dr. M. Schubert	
Prüfungsteilnehmer/in:	(Bitte leserlich in Druckbuchstaben)	
	Name:	_____ <u>S c h u b e r t</u> _____
	Vorname:	_____ <u>MUSTERLÖSUNG</u> _____
	Semester:	_____

>>>>> **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.

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 Das Grundprinzip der Verstärkung

In Abb. 1.1 (a) steuert die Stromquelle einen Strom i_2 durch die Impedanz Z_2 . Wie groß ist die dadurch verursachte Spannung u_2 über der Impedanz Z_2 ?

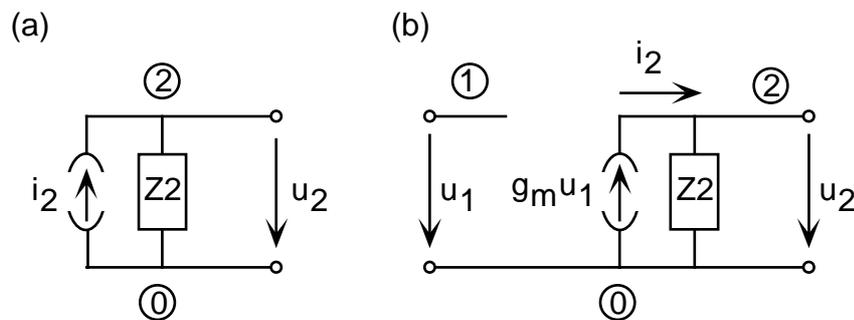
... $u_2 = i_2 \cdot Z_2$ (2P)

Der Strom i_2 werde gemäß Abb. 1.1 (b) durch die Spannung u_1 gesteuert: $i_2 = g_m \cdot u_1$. Wie groß ist die Spannungs-Verstärkung $A_V = u_2/u_1$ als Funktion von g_m und Z_2 ?

... $A_V = \frac{u_2}{u_1} = \frac{i_2 \cdot Z_2}{u_1} = \frac{g_m \cdot u_1 \cdot Z_2}{u_1} = g_m \cdot Z_2$ (3P)

Abbildung 1.1:

Ohm'sches Gesetz
und Grundprinzip
der Verstärkung



PS: Sie werden dieses Ergebnis noch benötigen.

2.1.2 Berechnung der Verstärkung A_V der Stufe

(a) Wie groß ist die Kleinsignal - Impedanz Z_2 des Knotens 2 gegen Masse als Funktion von g_m und $R_S^* = R_S \parallel R_L$?

$$\dots Z_2 = Z_{JS} \parallel R_S^* = (1/g_m) \parallel R_S^* = R_S^* / (1 + g_m R_S^*) \dots \dots \dots \quad (1P)$$

(b) Zeigen Sie, daß die Spannungsverstärkung der Schaltung gegeben ist durch $A_V = g_m R_S^* / (1 + g_m R_S^*)$.

$$\dots A_V = g_m \cdot Z_2 = g_m \cdot \frac{R_S^*}{1 + g_m R_S^*} \dots \dots \dots \quad (1P)$$

(c) Wie groß ist A_V für ein vorgegebenes Z_{out} gemäß der Näherung in Aufgabe 2.1.1 (b) ?

$$\dots A_V = \frac{g_m R_S^*}{1 + g_m R_S^*} = \frac{R_S^*}{Z_{out} + R_S^*} \quad \text{da} \quad Z_{out} = \frac{1}{g_m} \dots \dots \dots \quad (1P)$$

2.1.3 Berechnung von R_S und $u_{2,eff}$

(a) Wie groß ist R_S^* als Funktion von A_V und Z_{out} ?

$$R_S^* = \frac{A_V}{1 - A_V} Z_{out} \quad \text{da} \quad A_V = \frac{R_S^*}{Z_{out} + R_S^*} \dots \dots \dots \quad (2P)$$

(b) Wie groß ist R_S als Funktion von R_S^* und R_L ?

$$\dots R_S = \frac{R_L R_S^*}{R_L - R_S^*} \dots \dots \dots \quad (1P)$$

(c) Wie groß ist die Source-Spannung U_{Sa} als Funktion von R_S und I_{Da} ?

$$U_{Sa} = I_{Sa} R_S = I_{Da} R_S \quad (1P)$$

(d) Wie groß ist der Betrag der Spitzenspannung am Ausgang, \hat{u}_2 , den wir aussteuern können? Geben Sie den Betrag des möglichen Spitzenwertes \hat{u}_2 als Funktion von U_{DD} und U_{Sa} an.

$$\hat{u}_2 = \min(U_{Sa}, U_{DD} - U_{Sa}) \quad (1P)$$

2.1.4 Einstellung von U_{GS}

(a) Stellen Sie U_{GSa} als Funktion von V_T , I_{DSS} und I_{DSa} ein.

$$\dots U_{GSa} = V_T \left(1 - \sqrt{I_{Da} / I_{DSS}} \right) \dots \quad (1P)$$

(b) Berechnen Sie U_{Ga} als Funktion oben bereits berechneter Spannungen.

$$\dots U_{Ga} = U_{Sa} + U_{GSa} \dots \quad (1P)$$

(c) Berechnen Sie den Widerstand R_2 bei gegebenem U_{Ga} , R_1 und U_{DD}

$$\dots R_2 = \frac{U_{DD} - U_{Ga}}{U_{Ga}} R_1 \quad \text{da} \quad U_{Ga} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{DD} \dots \quad (1P)$$

(d) Berechnen Sie die Eingangs-Impedanz $Z_{in} = u_1/i_1$ der Schaltung.

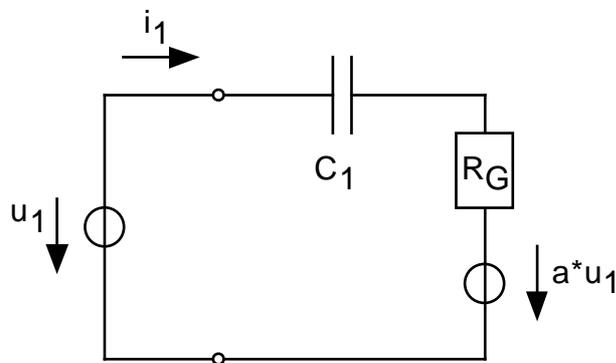
$$\dots Z_{in} = R_1 || R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \dots \quad (1P)$$

2.2 Bootstrap zur Erhöhung der Eingangs-Impedanz

Bootstrap steht für positive Rückkopplung mit einer Scheifenverstärkung kleiner Eins.

Abbildung 2.2:

Das Prinzip der positiven Rückkopplung, hier symbolisiert durch die Spannungsquelle $a \cdot u_1$.



Zeigen Sie, daß sich die Eingangs-Impedanz $Z_{in} = u_1/i_1$ in Abb. 2.2 berechnet zu $Z_{in} = R_G/(1-a)$. Der Blindwiderstand von C_1 sei vernachlässigbar.

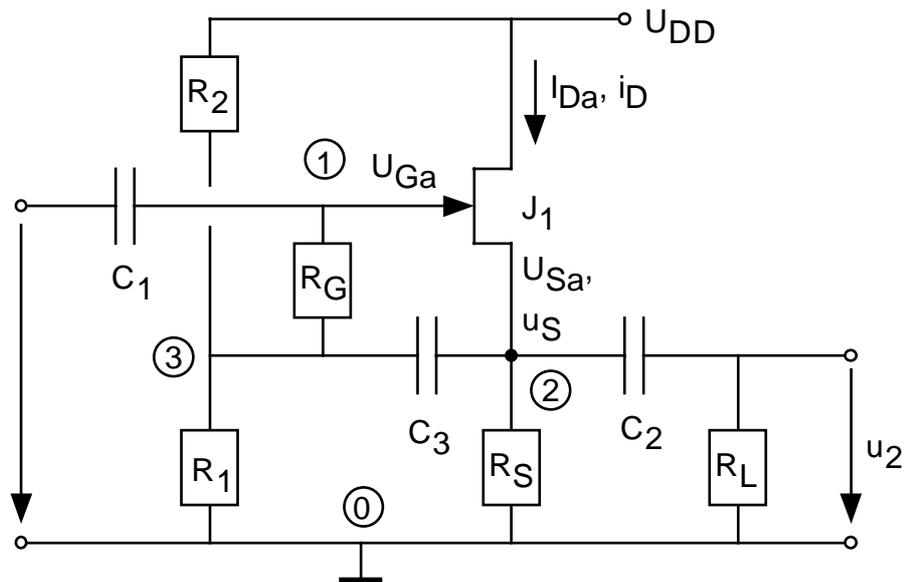
$$\dots Z_{in} = \frac{u_1}{i_1} = \frac{u_1}{u_1 - a \cdot u_1} = \frac{1}{1-a} R_G \dots \quad (4P)$$

2.3 Schaltung mit JFET und Bootstrap

Abb. 2.3 zeigt eine Verstärkerschaltung mit JFET. Sie dürfen alle Kapazitäten im interessierenden Frequenzband als Kleinsignal - Kurzschlüsse behandeln.

Abbildung 2.3:

Verstärkerschaltung mit JFET und Bootstrap-Schaltung.



2.3.1 Einstellung der Bootstrap - Schaltung

(a) Welches bzw. welche gegenüber Abb. 2.1 zusätzlichen Bauelemente realisieren in Abb. 2.3 die im vorigen Kapitel als $a \cdot u_1$ dargestellte Kleinsignal - Spannungsquelle ?

... C_3 (1P)

(b) Welcher der oben bereits berechneten Parameter der Schaltung liefert den Wert $a = u_3/u_1$?

... $a = A_V$ (1P)

(c) Einzustellen ist die Eingangs-Impedanz $Z_{in} = k \cdot R_G$. Wie groß muß A_V sein, um einen vorgegebenen Faktor $k = Z_{in}/R_G$ zu erreichen ?

... $A_V = 1 - \frac{1}{k}$ oder $A_V = 1 - \frac{R_G}{Z_{in}}$, da $Z_{in} = \frac{1}{1 - A_V} R_G$ (2P)

2.3.2 Rechnen eines Beispiels

Berechnen Sie im Folgenden Formel und Wert. Gegeben seien für die Verstärkerstufe in Abb. 2.3:

Gegeben: $J_1: V_T = -3V, I_{DSS} = 10mA; U_{DD} = 18V; R_1 = 10K\Omega; R_G = 1M\Omega; R_L = 7,5K\Omega.$

Verlangt: $Z_{in} = 10M\Omega; Z_{out} = 0,5K\Omega; \hat{u}_2 \geq 1V.$

(a) Berechnen Sie den benötigten Übertragungsleitwert g_m (Aufg. 2.1.1 (b))

$$\dots g_m = 1/Z_{out} = 1/0,5 K\Omega = 2 mS \dots \dots \dots (2P)$$

(b) Berechnen Sie die benötigte Verstärkung A_V , um den Eingangswiderstand von R_G auf Z_{in} zu erhöhen (Aufg. 2.3.1 (c))

$$\dots A_V = 1 - \frac{R_G}{Z_{in}} = 1 - \frac{1M\Omega}{10M\Omega} = 0,9 \dots \dots \dots (2P)$$

(c) Berechnen Sie den benötigten Widerstand R_S^* (wobei $R_S^* = R_S \parallel R_L$), um bei dem gegebenen Z_{out} die verlangte Verstärkung A_V zu erreichen. (Aufg. 2.1.3 (a))

$$R_S^* = \frac{A_V}{1 - A_V} Z_{out} = \frac{0,9}{1 - 0,9} \cdot 0,5K\Omega = 9 \cdot 0,5K\Omega = 4,5K\Omega \dots \dots \dots (2P)$$

(d) Berechnen Sie den benötigten Source-Widerstand R_S , um den Gesamtwiderstand R_S^* zu erreichen (Aufg. 2.1.3 (b))

$$\dots R_S = \frac{R_L R_S^*}{R_L - R_S^*} = \frac{7,5K\Omega \cdot 4,5K\Omega}{7,5K\Omega - 4,5K\Omega} = 11,25K\Omega \dots \dots \dots (2P)$$

(e) Berechnen Sie den benötigten Ruhestrom I_{Da} zur Erreichung des geforderten g_m (Aufg. 2.1.1 (c))

$$\dots I_{Da} \geq \frac{V_T^2}{4Z_{out}^2 I_{DSS}} = \frac{(-3V)^2}{4 \cdot (0,5K\Omega)^2 \cdot 10mA} = 0,9mA \dots \dots \dots (2P)$$

(f) Berechnen Sie die daraus folgende Source-Spannung U_{Sa} (Aufg. 2.1.3 (c))

$$U_{Sa} = I_{Da} R_S = 0,9mA \cdot 11,25K\Omega = 10,125V \dots \dots \dots (2P)$$

(g) Genügt das zum Aussteuern von \hat{u}_2 ? $\dots \dots$ ja: $1V \cdot \sqrt{2} \leq 10,125V \dots \dots$ (2P)

- (h) Berechnen Sie die benötigte Gate - Source - Spannung U_{GSa} zur Einstellung von I_{Da} (Aufg. 2.1.4 (a))

$$\dots U_{GSa} = V_T \left(1 - \sqrt{I_{Da} / I_{DSS}}\right) = -3V \left(1 - \sqrt{0,9mA / 10mA}\right) = -2,1V \dots \dots \dots \quad (2P)$$

- (i) Berechnen Sie die benötigte Gate - Spannung U_{Ga} zur Einstellung von I_{Da} (Aufg. 2.1.3 (c))

$$\dots U_{Ga} = U_{Sa} + U_{GSa} = 10,125 + (-2,1V) = 8,025V \dots \dots \dots \quad (2P)$$

- (j) Berechnen Sie den Widerstand R_2 zur Einstellung von U_{Ga} (Aufg. 2.1.4 (c))

$$\dots R_2 = \frac{U_{DD} - U_{Ga}}{U_{Ga}} R_1 = \frac{18V - 8V}{8V} 10K\Omega = 12,5K\Omega \dots \dots \dots \quad (2P)$$

2.3.3 Verständnisfragen

- (a) Durch welche Forderung ist der Drainstrom nach unten begrenzt ? (3P)

...Durch die Forderung $Z_{out} \cong 1/g_m \leq Z_{out,max}$

.....

.....

- (b) Warum dürfen wir den Drainstrom nicht erhöhen, indem wir R_S beliebig klein machen ? (3P)

... Weil ein gegebenes $A_V = g_m \cdot Z_2$ erreicht werden muß für Z_{in} .

... Dazu benötigen wir eine Mindest-Impedanz Z_2

- Warum legen wir das Gate nicht wie in anderen Schaltungen mit JFET einfach auf 0V ? (3P)

Um gleichzeitig einen gewissen Mindeststrom I_D (für Z_{out}) und eine Mindest-Impedanz Z_2 (für ein hinreichend hohes $A_V = g_m Z_2$ und somit ein hinreichend hohes Z_{in}) erreichen zu können, müssen wir die Spannung an R_S entsprechend hoch setzen. Anders läßt sich hoher Strom und hohes Z_2 nicht realisieren.

.....

3 Operationsverstärker

In der Werbung eines großen Halbleiter-Herstellers (z.B. „Electronic Design News“, May 1996, p. 30) finden Sie ein Bild wie in Abb. 3.1 mit der Innenschaltung eines Chips, bezeichnet als INA128. Der Widerstand R_{ext} wird vom Anwender extern zugeschaltet.

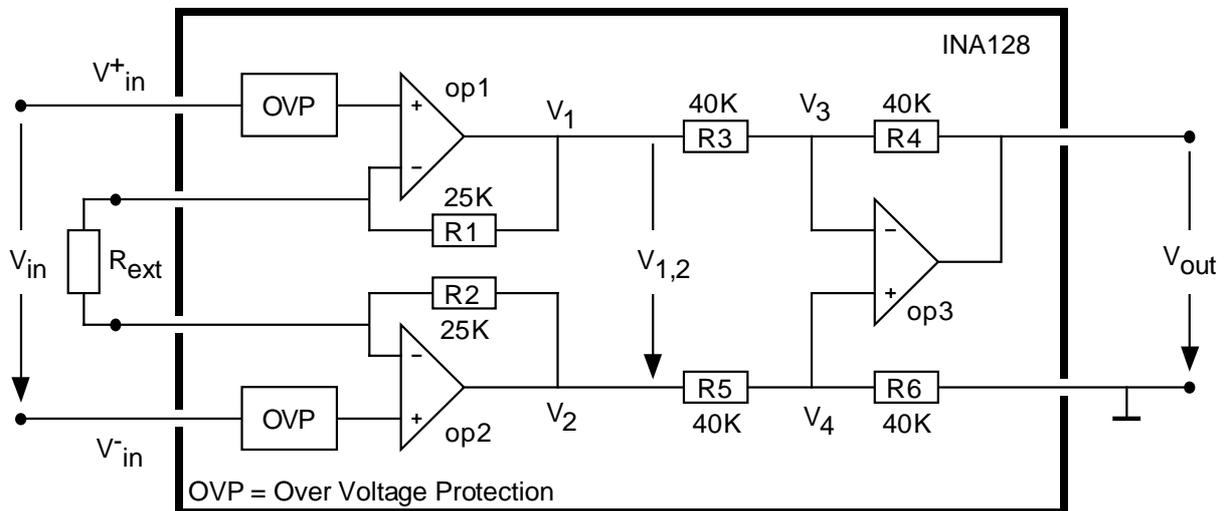


Abbildung 3.1: Stromlaufplan für einen „low power, general purpose instrumentation amplifier“. Am Überspannungsschutz (OVP) fällt im normalen Betrieb keine Spannung ab.

Trennen Sie die beiden Stufen des Verstärkers durch Einzeichnen einer gestrichelten Linie. **(2P)**

Berechnen Sie die Verstärkung A_{V1} der Eingangsstufe als Funktion der entsprechenden Widerstände. Bitte keine Zahlenwerte einsetzen. **(3P)**

An R_{ext} liegt V_{in} , der Strom durch R_{ext} muß durch R_1 , R_2 :

$$A_{V1} = \frac{V_{1,2}}{V_{in}} = \frac{R_1 + R_{ext} + R_2}{R_{ext}} = 1 + \frac{R_1 + R_2}{R_{ext}}$$

Berechnen Sie die Ausgangsspannung V_{out} als Funktion von V_1 und V_2 und der entsprechenden Widerstände. Bitte keine Zahlenwerte einsetzen. **(4P)**

$$V_4 = \frac{R_6}{R_5 + R_6} V_2$$

$$V_{out} = -\frac{R_4}{R_3} V_1 + \frac{R_3 + R_4}{R_3} V_4 = -\frac{R_4}{R_3} V_1 + \frac{R_6}{R_3} \cdot \frac{R_3 + R_4}{R_5 + R_6} V_2$$

Berechnen Sie die Verstärkung A_{V2} der Ausgangsstufe für den Fall, daß alle darin verwendeten Widerstände gleich groß sind. **(4P)**

$$R_3 = R_4 = R_5 = R_6 \Rightarrow V_{out} = -\frac{R_3}{R_3} V_1 + \frac{R_3}{R_3} \cdot \frac{R_3 + R_3}{R_3 + R_3} V_2 = -V_1 + V_2 = -V_{1,2}$$

$$A_{V2} = \frac{V_{out}}{V_{1,2}} = -1$$

Ermitteln Sie die Gesamt-Spannungs-Verstärkung A_V der Schaltung unter Ausnutzung der Tatsache, daß $R_1 = R_2$ und $R_3 = R_4 = R_5 = R_6$. Der Widerstand R_{ext} bleibt variabel. **(3P)**

$$A_V = A_{V1} \cdot A_{V2} = -\left| 1 + \frac{2R_1}{R_{ext}} \right|$$

Zeigen Sie: Aus dem letzten Ergebnis folgt, daß sich der benötigte externe Widerstand R_{ext} bei $R_1=25K\Omega$ und vorgegebener Gesamtverstärkung A_V wie folgt berechnet: $R_{ext} = \frac{50K\Omega}{|A_V| - 1}$ **(2P)**

$$-A_V = 1 + \frac{2R_1}{R_{ext}} \Rightarrow R_{ext} = \frac{2R_1}{-A_V - 1}. \quad \text{Da } -A_V \geq 1 \text{ (} -A_V = 1 \text{ für } R_{ext} \rightarrow \infty \text{): } R_{ext} = \frac{50K\Omega}{|A_V| - 1}.$$

Das Chip INA141 ist fast identisch dem INA128. Es hat jedoch einen fest eingebauten Amplitudengang von 20 dB über einen weiten Frequenzbereich. Welchen Widerstand verwendet der Hersteller in diesem Fall für R_{ext} ? **(2P)**

$$R_{ext} = \frac{50K\Omega}{-(-10) - 1} = 5,556K\Omega.$$

4 Kompensation rückgekoppelter Systeme

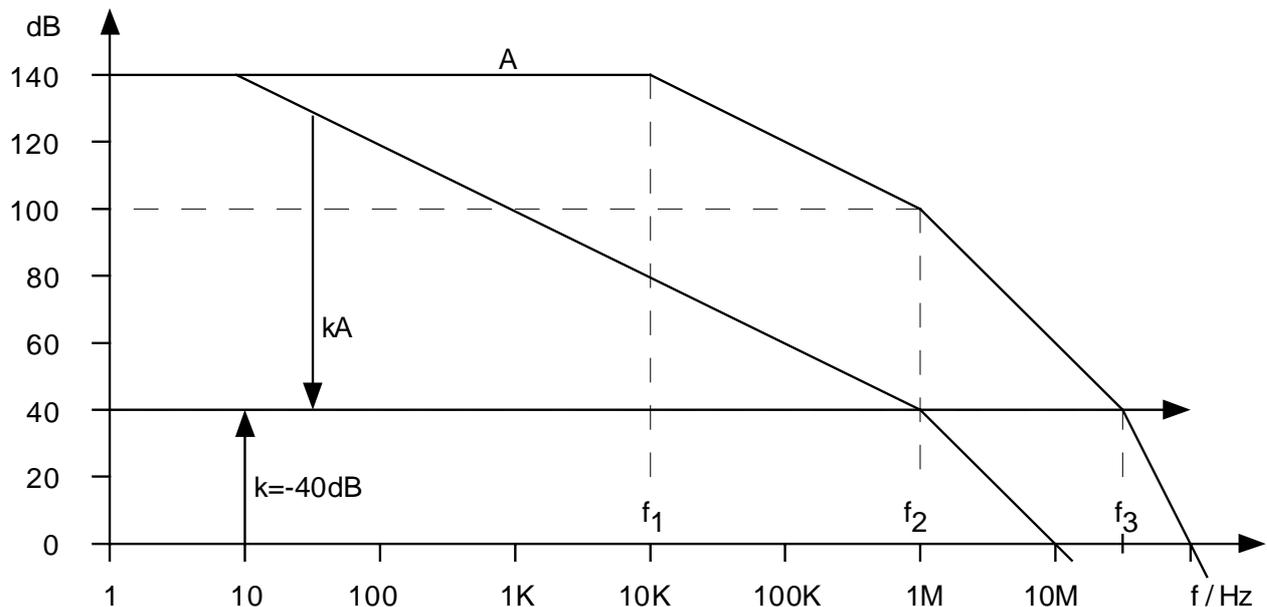


Abbildung 4.1: Amplitudengang A eines Operationsverstärkers über der Frequenzachse

Ein Operationsverstärker hat den in Abb. 4.1 dargestellten Amplitudengang A als Funktion der Frequenz. In der Beschaltung als Nicht-Invertierer gemäß Abb. 4.2 (a) wird eine „Phasenreserve“ von $\Phi_R = -45^\circ$ (in Worten: **minus** fünfundvierzig Grad) erreicht.

- (a) Wie groß ist die Verstärkung A^* des rückgekoppelten Systems, wie groß die Dämpfung des Rückkopplungs-Netzwerkes k ? Stellen Sie $1/k$ und kA in Abbildung 4.1 grafisch dar. **(5P)**

Für die Verstärkung des rückgekoppelten Systems gilt $A^* = A/(1+kA) \cong 1/k$ wenn $|kA| \gg 1$, was hier der Fall ist.

Grafisch bedeutet dies, daß A um die Dämpfung k verringert werden muß, um die Stabilität der offenen Schleife inklusive dem Rückkopplungsnetzwerk k zu prüfen. Statt A um k herabzusetzen, ist es leichter, die Abszisse um $1/k$ (in dB) heraufzuschieben.

Da die Phasenreserve gegen -180° gemessen wird und $\Phi_R = -45^\circ$ beträgt, muß das System bei $A^* = 0\text{dB}$ eine Phasendrehung von -135° aufweisen. Wir müssen die Abszisse so weit heraufschieben, daß sie $A(f)$ im Knick des Dritten Pols schneidet. Das ist bei $A(f_3) = 40\text{dB}$.

- (b) Wie groß ist R_2 in Abb. 4.2(a), wenn $R_1 = 1\text{K}\Omega$ beträgt und obiges System realisiert wird? **(3P)**

Es ist $A^* = 40\text{dB} = 100$. Da A^* in Abb. 4.2(a) durch $A^* = 1 + R_2/R_1$ gegeben ist, muß $R_2 = 99\text{K}\Omega$ sein.

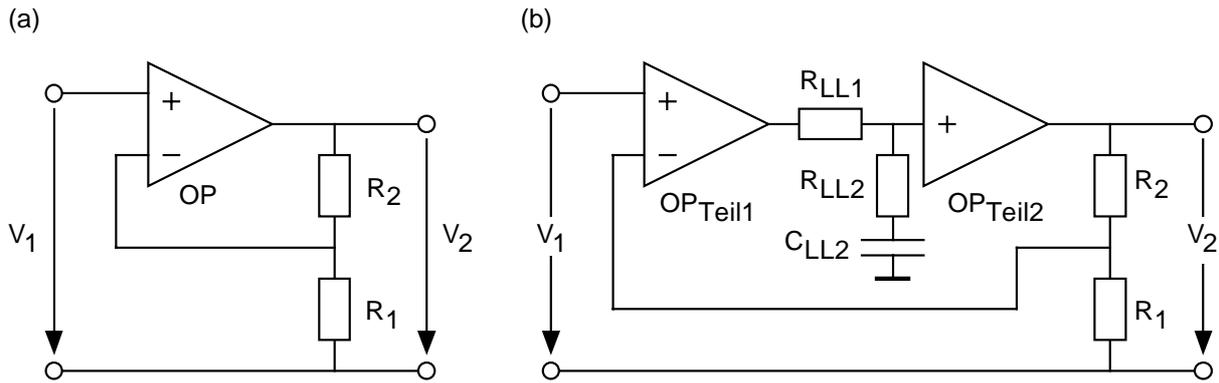


Abbildung 4.2: (a) Operations-Verstärker als Nicht-Invertierer, (b) mit Lead-Lag - Kompensation.

- (c) Wir schalten ein Lead-Lag - Glied gemäß Abb. 4.2 (b) so zwischen zwei Stufen des OPs, daß Stabilität, also eine Phasenreserve von $\Phi_R=45^\circ$, erreicht wird. Der Eingangswiderstand beider Teile des OPs kann als unendlich angenommen werden. **Gegeben ist $R_{LL1}=1M\Omega$, gesucht sind R_{LL2} , C_{LL2} und f_{p1}^* , der dominante Pol des kompensierten Systems.** (12P)

Für eine Phasenreserve von 45° muß der zweite Pol auf der 0dB-Linie der Übertragungsfunktion k_A liegen. Da er sich ohne LL-Glied 60dB darüber befindet, müssen die Widerstände des LL-Gliedes -60dB dämpfen, wenn der Blindwiderstand der Kapazität C_{LL2} vernachlässigbar ist. $-60dB=1/1000$. Daher ergibt sich

$$\frac{R_{LL2}}{R_{LL1} + R_{LL2}} = \frac{1}{|A(f_{p2})|} = \frac{1}{1000} \quad (2P)$$

$$R_{LL2} = 1,001K\Omega \cong 1K\Omega \quad (2P)$$

$$\text{Nullstelle des LL-Gliedes: } f_{LL0} = \frac{1}{2\pi R_{LL2} C_{LL2}} \quad (2P)$$

Die Nullstelle des LL-Gliedes muß den Pol f_{p1} kompensieren:

$$f_{LL0} = f_{p1} = 10KHz \quad (2P)$$

$$\text{Daraus folgt: } C_{LL2} = \frac{1}{2\pi R_{LL2} f_{LL0}} = \frac{1}{2\pi \cdot 1K\Omega \cdot 10KHz} = 15,9nF \quad (2P)$$

Es ist $f_{p1}^* = f_{LLP}$, welches sich mittels Grafik oder Verstärkungsbandbreite-Produkt zu $f_{LL0}/1000$ ($1/1000=-60dB$) ergibt oder mit (2P)

$$f_{LLP} = \frac{1}{2\pi(R_{LL1} + R_{LL2})C_{LL2}} = \frac{1}{2\pi(R_{LL1} + R_{LL2}) \frac{1}{2\pi R_{LL2} f_{LL0}}} = \frac{R_{LL2}}{R_{LL1} + R_{LL2}} f_{LL0} = \frac{f_{LL0}}{1000} = 10Hz$$