

Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg

Studiengang Elektro- und Informationstechnik

Prüfungsfach:	Analoge Schaltungstechnik (SC), WiSe 2020/2021		
Prüfungstermin:	08. Februar 2021	Studiengruppe:	EI4
Prüfungsdauer:	90min (planmäßig: 11:15-12:45h), Raum <virtuell>		
Zugelassene Hilfsmittel:	alles, abzugeben sind handschriftliche Lösungsblätter		
Aufgabensteller:	Prof. Dr. Martin Schubert		
Prüfungsteilnehmer/in:	(Bitte leserlich in Druckbuchstaben)	Sem.:	_____
Name:	_____		
Vorname:	_____	MatNr:	_____

Ihre Lösungsblätter sind handschriftlich zu erstellen. Sie müssen im Zweifelsfall an Ihrer Handschrift identifizierbar sein!

Zusätzliche Blätter können nur dann gewertet werden, wenn Sie durch Angabe der >Prüfung, des Namens, des Datums und der bearbeiteten Aufgabe **eindeutig zuzuordnen** sind !

Maximal erreichbare Punktzahl: 90 Punkte

Runden Sie Zahlenwerte typischerweise auf drei Dezimalstellen oder auf so viele, wie offensichtlich notwendig sind (z.B. $x=0,9997$, wenn das Ergebnis $x<1$ sein muss).

>>>> Rot ist Korrekturfarbe, bitte keinen Rotstift verwenden ! <<<<<

Im Folgenden stehen die Buchstaben MNR für die letzten drei Ziffern Ihrer Matrikelnummer.
Beispiel: Mat.Nr.=1234567 → M=5, N=6, R=7. Also ist 1MNR=1567 und 2,MNR=2,567.

Weitere Hinweise:

1. Die Aufgaben sind so aufgebaut, dass Folgefehler nach Möglichkeit vermieden werden. Nach „Rechnen Sie weiter mit...“ ist unbedingt mit dem gegebenen Wert weiterzurechnen.
2. Kalkuliert wurde ein Zeitbedarf von ca. einem Punkt pro Minute. Verwenden Sie nicht zu viel Zeit für Aufgaben, die nur wenige Punkte bringen.

Punkte:	Note:	Datum:	Prüfer: Prof. Dr. M. Schubert
---------	-------	--------	-------------------------------

1 Grundlagen: LTI-Modelle in s

($\Sigma=34P$)

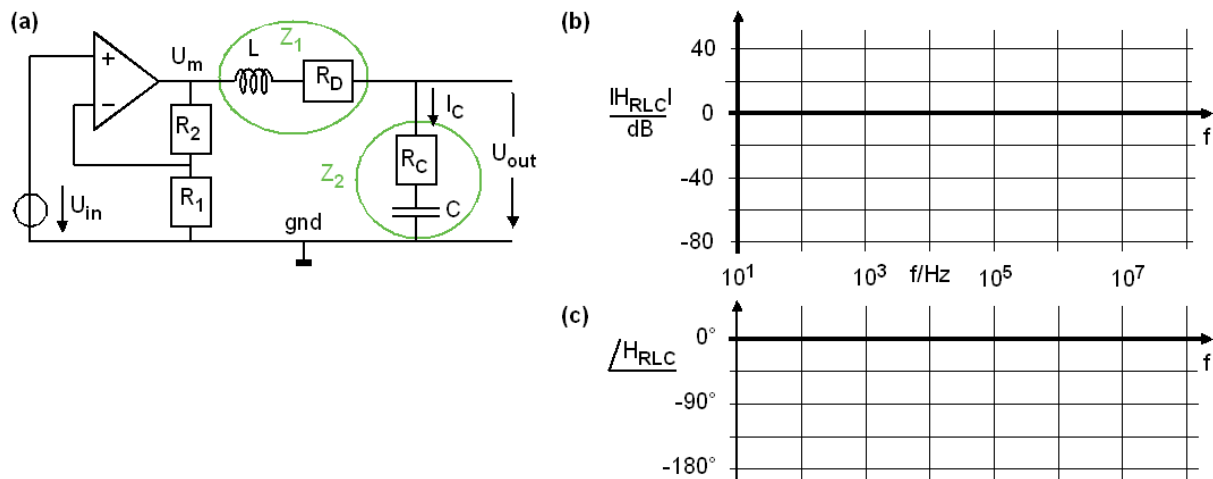


Bild 1: (a) OpAmp mit RLC-Tiefpass, (b) Amplitudendiagramm, (c) Phasendiagramm

Bild 1 (a) zeigt eine Verstärkerstufe aufgebaut mit einem idealen Operationsverstärker und nachgeschaltetem RLC-Tiefpass mit der Übertragungsfunktion $H_{RLC}(s) = U_{out}(s)/U_m(s)$; dabei ist s die Laplace-Variable.

Die Gesamtschaltung habe eine DC-Verstärkung von $A_0 = 40\text{dB}$, eine doppelte Polstelle in $f_{p1,2} = 1\text{ kHz}$ (d.h. $|s_{p1}| = |s_{p2}| = 2\pi \cdot 1000\text{ rad/s}$) und eine Nullstelle in $f_{n1} = 100\text{ fP}$.

(a) Es sei $R_1 = 1\text{ k}\Omega$. Wie groß ist R_2 ? (2P)

Skizzieren Sie in Bild 1...

(b) ... die Asymptotennäherung des Amplitudengangs $|H(f)|$ in Bildteil (b) und (3P)

(c) ... die Asymptotennäherung des Phasengangs von $H(f)$ in Bildteil (c). (4P)

(d) Stellen Sie die Formel auf für $Z_1(s)$ gemäß der grünen Kennzeichnung in Bild 1 (a). (1P)

(e) Stellen Sie die Formel auf für $Z_2(s)$ gemäß der grünen Kennzeichnung in Bild 1 (a). (1P)

(f) Wie berechnet sich die Übertragungsfunktion $H_{RLC}(s) = U_{out}(s)/U_m(s)$ des Tiefpasses als Funktion von $Z_1(s)$ und $Z_2(s)$? (1P)

(g) Ermitteln Sie die Übertragungsfunktion $H_{RLC}(s) = U_{out}(s)/U_m(s)$ des RLC-Tiefpasses als Funktion von R_C , R_D , L , C und der Laplace-Variablen s . Gefragt ist eine Doppelbruch-freie Formel. (Darin kommt eine Klammerung vor.) (2P)

(h) Wir setzen in der Laplace Darstellung $s=j\omega$. Worin liegt der Vorteil, Übertragungsfunktionen als $H(s)$ zu beschreiben und nicht als $H(j\omega)$, obwohl die Substitution $s = j\omega$ nur eine kleine Änderung ist? (1P)

- (i) Welche Bedingungen müssen bei der Messung eingehalten werden, um die Übertragungsfunktion $H(j\omega)$ messtechnisch zu verifizieren? (2P)
- (j) Welche Übertragungsfunktion beschreibt das Gesamtsystem $H(s) = U_{out}(s) / U_{in}(s)$ als Funktion von A_0 , R_C , R_D , L , C ? (1P)

Die Gesamtübertragungsfunktion $H(s)$ lasse sich darstellen als

$$H(s) = \frac{U_{out}(s)}{U_{in}(s)} = A_0 \frac{1 + s / \omega_n}{1 + s / \omega_0 + s^2 / \omega_0^2} = K \cdot \frac{s - s_n}{(s - s_{p1})(s - s_{p2})}$$

- (k) Herzuleiten als Formeln und Werte sind: K (2P), s_n (1P), s_{p1} und s_{p2} (2P) (5P)
- (l) Das Eingangssignal sei $U_{in}(t) = 10 \text{ mV}$ für $t < 0$ und 0 V für $t \geq 0$. Wie verhält sich $U_{out}(t)$? (4P)
- (m) Berechnen Ihre persönliche Frequenz $f_{MNR} = (1000 + \text{MNR}) \text{ Hz}$, wobei MNR die letzten 3 Ziffern Ihrer Matrikelnummer sind. (1P)
- (n) Berechnen Sie die Werte für Amplitude und Phase von $H_{RLC}(s)$ in der Frequenz f_{MNR} . (2P)
- (o) Das Gesamtsystem wird mit einem sinusförmigen Signal mit Amplitude von 10 mV auf der Frequenz f_{MNR} angeregt. Welche Amplitude und welche Verzögerung beobachten wir im Zeitbereich? (2P)
- (p) Gegeben sei $C = (400 + \text{MN}, \text{R}) \mu\text{F}$. (C liegt also im Wertebereich $400 \dots 500 \mu\text{F}$.) Ermitteln Sie C , L , R_C und R_D als Formeln und Werte. (4P)

2 Schaltkreisanalyse-Methoden

($\Sigma=20P$)

Bild 2: Schaltung mit Bipolartransistor. Ziffern in Kreisen sind Knotenlabel.

Early-Spannung: $V_A = 100V$
Stromverstärkung $\beta_0 = 120$

Zur Berechnung sind gemäß Vorlesung folgende Modellgleichungen zu verwenden:

$$I_{C0} = I_S \cdot e^{\frac{U_{BE}}{u_T}}, \quad u_T = kT / q,$$

$$I_C = I_{C0} (1 + U_{CE} / V_A),$$

$$\beta = I_C / I_B = \beta_0 (1 + U_{CE} / V_A)$$

$$g_m = I_C / u_T, \quad r_m = 1 / g_m$$

$$r_{BE} = \beta \cdot r_m, \quad r_{CE} = 1 / g_{CE},$$

$$g_{CE} = I_C / (V_A + U_{CE}).$$

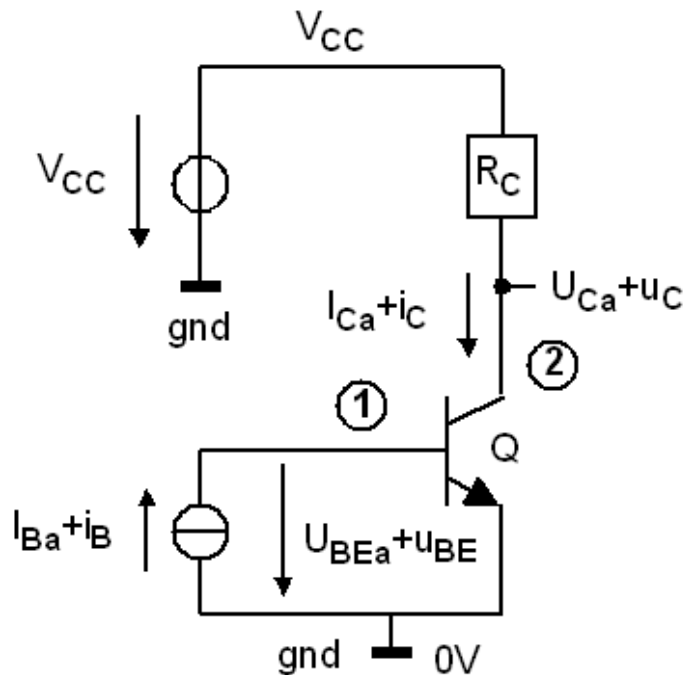


Bild 2 zeigt eine Verstärkerschaltung mit Bipolar-Transistor. Sei $u_T = 25 \text{ mV}$, $V_{CC} = 20V$ und der Arbeitspunkt des Kollektors bei $U_{Ca} = 10V$.

- (a) In welcher Schaltungsart (z.B. Source-, Drain-, Basis-... Schaltung) wird dieser Transistor betrieben? (1P)

Berechnung des Arbeitspunktes

- (b) Welche Spice-Direktive gibt den berechneten Arbeitspunkt aus? (1P)
- (c) Der Kollektorstrom im Arbeitspunkt betrage $I_{Ca} = 1, MNR \text{ mA}$, wobei MNR die letzten die 3 Ziffern Ihrer Matrikelnummer sind. Berechnen Sie Widerstand R_C sowie I_{Ca} , β_a , I_{Ba} , wobei Index a „im Arbeitspunkt“ bedeutet. (Gefragt sind jeweils Formel und Wert.) (4P)

Berechnung des DC-Kleinsignal-Ersatzschaltbildes (ESBs)

- (d) Welche *Spice*-Direktive fordert die Berechnung des DC-Kleinsignal-ESBs und deren Ausgabe an? (1P)
- (e) Skizzieren Sie das DC-Kleinsignal-ESB der Schaltung in Bild 2. (5P)
- (f) Sei $\beta_a = 132$. Berechnen Sie die Kleinsignalgrößen g_{ma} , r_{BEa} , r_{CEa} , Z_{2a} (=Impedanz des Knotens mit Label 2) als g_m , r_{BE} , r_{CE} , Z_2 im Arbeitspunkt, sowie die Kleinsignalverstärkung A_{Va} als $A_V = u_C/u_{BE}$ im Arbeitspunkt. Gefragt sind Formeln und Werte. (6P)
- (g) Welche *Spice*-Direktive fordert eine Simulation mit dem AC-Kleinsignal-ESB über der Frequenzachse an? Es genügt die Benennung der Direktive, ohne Zusatzparameter. (1P)

3 Berechnung von Polen mit Miller-Effekt ($\Sigma=20P$)

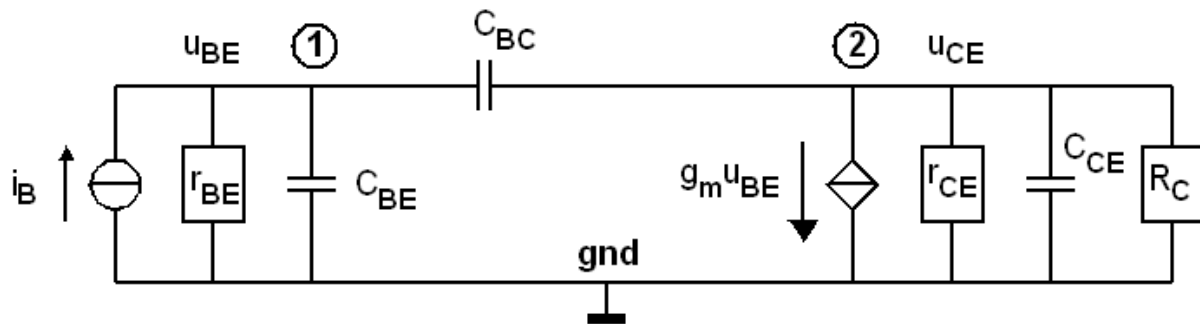


Bild 3: Kleinsignal-(Ersatz-)Schaltbild. Ziffern in Kreisen sind Knotenlabels.

Sei $R_C=10\text{K}\Omega$; $r_{BE}=3,5\text{K}\Omega$, $r_{CE}=100\text{K}\Omega$, $A_V = -340$, Basis-Emitter-Kapazität $C_{BE} = 35,5\text{ pF}$, Basis-Kollektor-Kapazität $C_{BC} = 8,5\text{ pF}$, Basis-Emitter-Kapazität: $C_{CE} = 3,5\text{ pF}$.

Gefragt sind jeweils Formel und Wert.

- (a) Zeichnen Sie die Schaltung in Bild 3 so um, dass die Pole der Spannungen u_{BE} und u_{CE} unabhängig voneinander berechnet werden können. (6P)

- (b) Berechnen Sie die Kapazität C_1 als die gesamte parallel zu r_{BE} gemessene Kapazität. (4P)

- (c) Berechnen Sie den Pol f_{p1} des Knotens (1), also der Spannung u_{BE} . (2P)

- (d) Berechnen Sie die Kapazität C_2 als die gesamte parallel zu r_{CE} gemessene Kapazität. (4P)

- (e) Berechnen Sie den Pol f_{p2} des Knotens (2), also der Spannung u_{CE} . (4P)

4 Messung der Änderung eines Widerstands R_4 ($\Sigma=16P$)

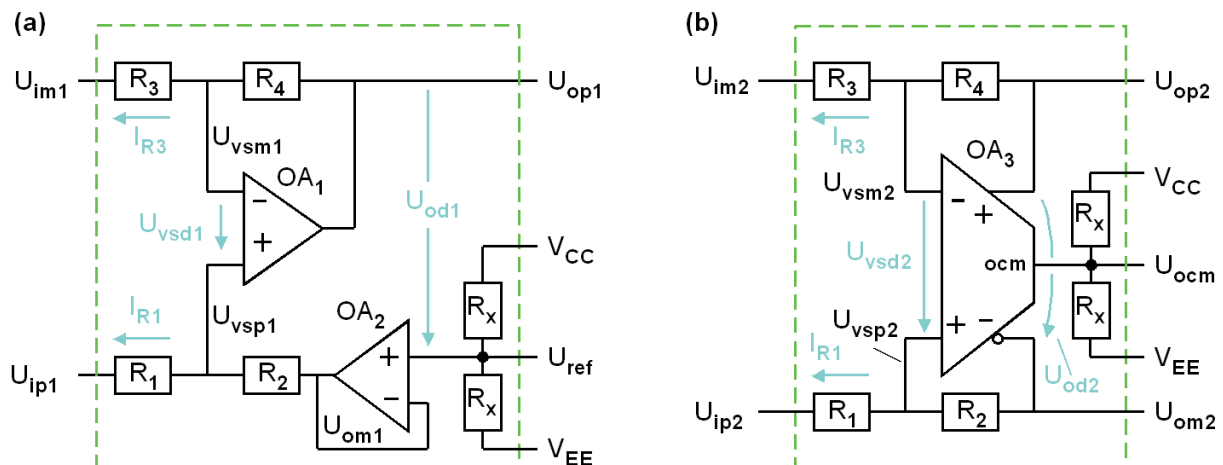


Bild 4: Verstärker mit (a) Single-Ended und (b) vollständig differentiellem OpAmp (OA),
Index-Nomenklatur: $i##$ und $o##$: Ein- und Ausgänge der Schaltung,
 $vs##$ (virtual short): direkte Eingangsspannungen der OpAmps;
 $#m##$ und $#p##$: invertierend und nicht-invertierend; 1 und 2: Bildteile (a) und (b).

Alle Operationsverstärker $OA_{\#}$, $\# = 1, 2, 3$, werden mit der positiven und negativen Versorgungsspannung V_{CC} und V_{EE} versorgt und als ideal angenommen. Das heißt: Für alle Frequenzen gilt Eingangsimpedanzen $Z_{in} \rightarrow \infty$ und Spannungsverstärkung $A_V \rightarrow \infty$, Ausgangsimpedanzen $Z_{out} = 0$ sowie Rail-to-Rail Output Swing: $V_{EE} \leq U_{o##} \leq V_{CC}$.

(a) Warum dürfen wir annehmen $U_{vsd1} = U_{vsd2} = 0$? (1P)

(b) Welche Beziehung besteht zwischen den Spannungen U_{om1} und U_{ref} in Bildteil (a)? (1P)

Wir legen alle 4 Eingangsspannungen auf Masse: $U_{im1} = U_{ip1} = U_{im2} = U_{ip2} = 0V$.

(c) Bildteil (a): Gegeben sei U_{ref} . Welche Spannungen U_{vsp1} und U_{vsm1} stellen sich ein als Funktion U_{ref} , R_1 , R_2 ? (2P)

(d) Bildteil (a): Sei $R_3 = R_1$. Welcher Strom I_{R3} fließt durch die Widerstände R_3 und R_4 als Funktion von U_{ref} , R_1 , R_2 ? (2P)

(e) Bildteil (b): Bekannt sei U_{om2} . Welche Spannungen U_{vsp2} und U_{vsm2} stellen sich ein als Funktion U_{om2} , R_1 , R_2 ? (2P)

(f) Bildteil (b): Sei $R_3 = R_1$. Welcher Strom I_{R3} fließt durch die Widerstände R_3 , R_4 als Funktion von U_{om2} , R_1 , R_2 ? (2P)

(g) Gilt für beide Bildteile: $R_4 = R_2 + \Delta R$ mit Messgröße ΔR . Welche Spannungsdifferenz $U_{od\#} = U_{op\#} - U_{om\#}$, $\# = 1, 2$, stellt sich ein als Funktion von U_{om2} , ΔR , R_1 , R_2 ? (3P)

(h) Eingepägt werden U_{om1} für Bildteil (a) und U_{ocm} für Bildteil (b). Welcher der beiden Messverstärker liefert eine lineare Abhängigkeit $U_{od\#} = f(\Delta R)$ und welcher nicht? Begründen Sie ihre Antwort. (3P)