

# Verstärker in Emitter-Schaltung

Laborbericht  
an der Fachhochschule Zürich

vorgelegt von

Samuel Benz

Leiter der Arbeit: B. Obrist  
Fachhochschule Zürich

Zürich, 2.12.2002 Samuel Benz

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Vorgaben</b>	<b>1</b>
1.1	Grundschialtung . . . . .	1
1.2	Kenndaten . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Aufgaben und Auswertungen</b>	<b>3</b>
2.1	Dimensionierung . . . . .	3
2.1.1	DC-Analyse . . . . .	3
2.1.2	AC-Analyse . . . . .	4
2.2	Aufbau . . . . .	6
2.3	Linearität . . . . .	6
2.4	Impedanz und Verstärkung . . . . .	9
2.5	Amplituden- und Frequenzgang . . . . .	11
2.6	DC-Einfluss von RE . . . . .	11
2.7	AC-Einfluss von RE . . . . .	11
<b>A</b>	<b>Messmittel</b>	<b>14</b>

# Kapitel 1

## Vorgaben

### 1.1 Grundschtung

Die Emitterschaltung nach Abbildung 1.1 ist eine sehr häufig angewandte Transistorschaltung. Sie ist dadurch gekennzeichnet, dass diese eine hohe Strom- und Spannungsverstärkung bei mittlerer Ein- und Ausgangsimpedanz aufweist.

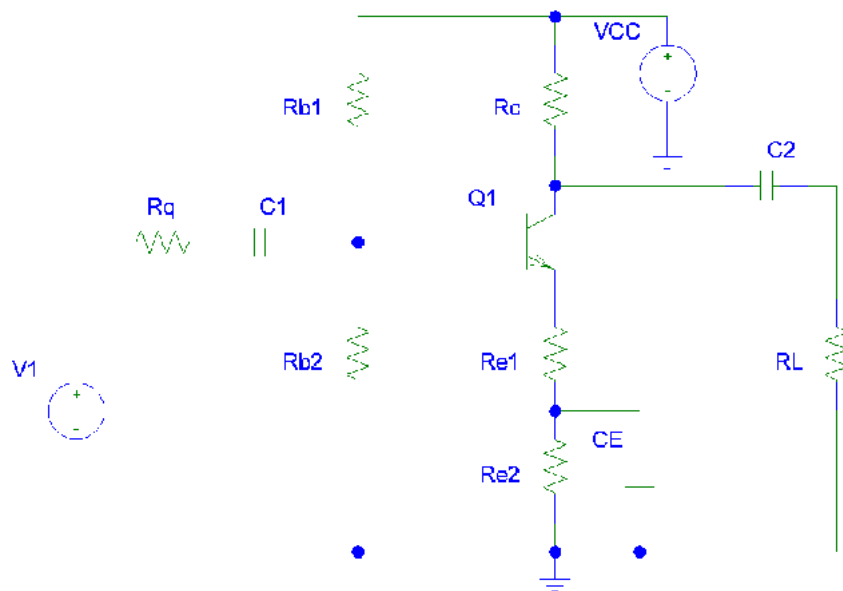


Abbildung 1.1: Emitterschaltung mit Arbeitspunkteinstellung durch Gleichstromgegenkopplung

Das Ziel des vorliegenden Versuches besteht in der theoretischen Dimen-

sionierung und im praktischen Aufbau mit anschliessender Ausmessung der Emitterschaltung nach Abbildung 1.1.

## 1.2 Kenndaten

Transistor:	<i>BC107</i>
$U_{BATT}$ :	$+15V$
Spannungsverstärkung:	100
Stromverstärkung:	10
Querstrom:	$I_s = 10 * I_b$
Kollektorstrom:	$I_C = 5mA$
Untere Grenzfrequenz:	$f_u = 1kHz$
Obere Grenzfrequenz:	$f_o = 100kHz$
Innenwiderstand der Signalquelle:	$R_q = 600$

$$U_{RC} = U_{CE} = U_{RE} = \frac{1}{3} * U_{BATT}$$

Der -3dB Abfall an der unteren Grenzfrequenz ist auf alle drei Hochpassglieder ( $C_E, C_1, C_2$ ) gleichmässig aufzuteilen.

# Kapitel 2

## Aufgaben und Auswertungen

### 2.1 Dimensionierung

*Unter Berücksichtigung der verlangten Pflichtdaten ist eine komplette gleichstrom- und wechselstrommässige Dimensionierung der Emitterschaltung nach Abbildung 1.1 durchzuführen. Für die Berechnung von  $Z_{ein}$  sind die Kapazitäten  $C_E$ ,  $C_1$  und  $C_2$  als Kurzschlüsse zu betrachten. Zur Bestimmung der Entkopplungskondensatoren  $C_E$ ,  $C_1$  und  $C_2$  berechne man den Frequenzgang ( $G(j\omega) = U_2(j\omega)/U_1(j\omega)$ ) der Emitterschaltung und zeichne den asymptotischen Verlauf des Amplituden- und Phasengang in Bode-Darstellung auf.*

#### 2.1.1 DC-Analyse

Spannungen [1]:

$$U_{RC} = U_{CE} = U_{RE} = \frac{1}{3} * U_{BATT} = \frac{1}{3} * 15V = 5V \quad (2.1)$$

$$U_{RB2} = U_{CE} + U_{BE} = 5V + 0.7V = 5.7V \quad (2.2)$$

$$U_{RB1} = U_{BATT} - U_{RB2} = 15V - 5.7V = 9.3V \quad (2.3)$$

Ströme:

$$I_B = \frac{I_C}{B} = \frac{5mA}{290} = 17.2\mu A \quad (2.4)$$

$$I_S = 10 * I_B = 10 * 17.2\mu A = 172.4\mu A \quad (2.5)$$

Widerstände:

$$R_C = \frac{U_{RC}}{I_C} = \frac{5V}{5mA} = 1k\Omega \quad (2.6)$$

$$R_E = \frac{U_{CE}}{I_C + I_B} = \frac{5V}{5mA} = 1k\Omega \quad (2.7)$$

$$R_{RB1} = \frac{U_{RB1}}{I_S} = \frac{9.3}{172.4\mu A} = 53.9k\Omega \quad (2.8)$$

$$R_{RB2} = \frac{U_{RB2}}{I_S - I_B} = \frac{5.7V}{172.4\mu A - 17.2\mu A} = 36.7k\Omega \quad (2.9)$$

$$R_{be} = \frac{U_T}{I_{b0}} = \frac{26mV}{17.2\mu A} = 1.5k\Omega \quad (2.10)$$

### 2.1.2 AC-Analyse

Widerstände:

$$R_E = R'_E + R''_E = 1k\Omega \quad (2.11)$$

$$v_u = 100 = \frac{\beta * (R_C \parallel (10 * (r_{be} + (\beta + 1) * R'_E \parallel R_{B1} \parallel R_{B2})))}{(r_{be} + (\beta + 1) * R'_E)} \quad (2.12)$$

$$R'_E \rightarrow aus(2.12) = 4.5\Omega \quad (2.13)$$

$$R''_E = R_E - R'_E = 1k\Omega - 4.5\Omega = 995.5\Omega \quad (2.14)$$

$$R_{ein} = (r_{be} + (\beta + 1) * R'_E) \parallel R_{B1} \parallel R_{B2} = 2.52k\Omega \quad (2.15)$$

$$R_L = \frac{v_u}{v_i} * R_{ein} = \frac{100}{10} * R_{ein} = 25.2k\Omega \quad (2.16)$$

Kondensatoren [2]:

$$f'_{gu} = \frac{f_{gu}}{\frac{1}{\sqrt{\sqrt[3]{2}-1}}} = 509.8Hz \quad (2.17)$$

$$C_1 = \frac{1}{2 * \pi * f'_{gu} * (R_{ein} + R_G)} = 99.7nF \quad (2.18)$$

$$C_2 = \frac{1}{2 * \pi * f'_{gu} * (R_{aus} + R_L)} = 11.9nF \leftarrow \text{mit } R_{aus} = R_C \quad (2.19)$$

$$C_E = \frac{1}{2 * \pi * f'_{gu} * (R'_E + R''_E)} = 69.7\mu F \quad (2.20)$$

Somit ergibt sich die Schaltung zu Abbildung 2.1:

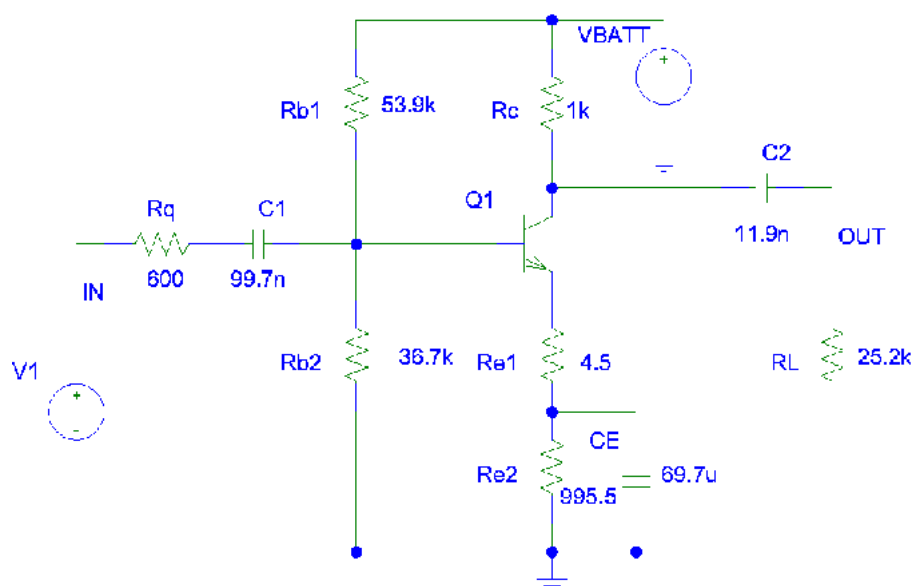


Abbildung 2.1: Berechnete Emitterschaltung

Der asymptotische Verlauf des Amplituden- und Phasenganges in Bode-Darstellung ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

$$G_1(j\omega) = \frac{j\omega C_1 (R_{ein} + R_G)}{j\omega C_1 (R_{ein} + R_G) + 1} \quad (2.21)$$

$$G_3(j\omega) = \frac{j\omega C_2 R_L}{j\omega C_2 (R_{aus} + R_L) + 1} \quad (2.22)$$



$$G_2(j\omega) = \frac{-\beta R_C}{r_{be} + (\beta + 1)(R'_E + R''_E)} * \frac{j\omega T_1 + 1}{j\omega T_2 + 1} \quad (2.23)$$

$$T_1 = C_E R''_E \quad (2.24)$$

$$T_2 = R''_E C_E \frac{r_{be}(\beta + 1)R'_E}{r_{be}(\beta + 1)(R'_E + R''_E)} \quad (2.25)$$

## 2.2 Aufbau

Aufgrund der in Aufgabe 2.1 durchgeführten Dimensionierung, ist die Emitterschaltung im Labor aufzubauen und in Betrieb zu nehmen. Dabei sind sämtliche Gleichspannungspotentiale bezüglich des Signalnullpunktes auszumessen und mit den theoretischen Werten zu vergleichen.

Spannung:	theoretischer Wert:	praktischer Wert:
$U_{BATT}$	+15V	+15.175V
$U_C$	10V	9.95V
$U_E$	5V	5.24V
$U_B$	5.7V	5.88V
$U_{RB2}$	4.97V	5.22V

Die theoretischen DC-Werte stimmen mit den Praktischen ziemlich gut überein. Die Abweichungen erkläre ich mir mit Bauteiltoleranzen aller Widerstände bis zu 10% aber vor allem dem  $B$  des Transsistors, welches ich mit einem mittleren Wert von 290 angenommen habe.

## 2.3 Linearität

Bei mittleren Frequenzen (ca. 10kHz) ist die Linearität der Verstärkerschaltung  $U_2 = f(U_1)$  auszumessen und graphisch auszuwerten.

Die Linearität ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Ab einer Eingangsspannung von  $U_1 > 126mV$  wird der Ausgang verzerrt. Dies muss auch so sein; da die Speisespannung 15V beträgt kann die Ausgangsspannung des Verstärkers nicht grösser werden.

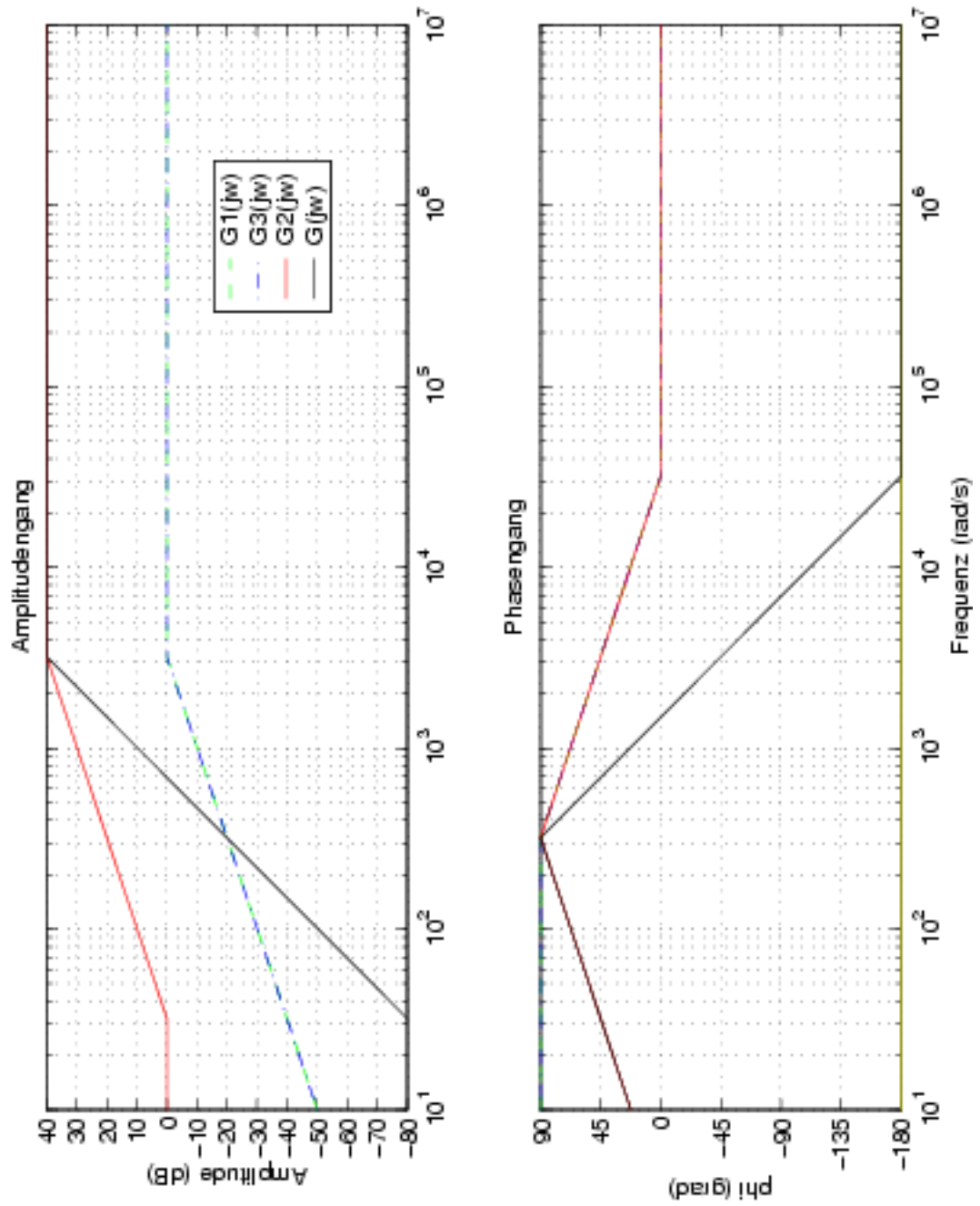


Abbildung 2.2: Amplituden- und Phasengang in Bodedarstellung

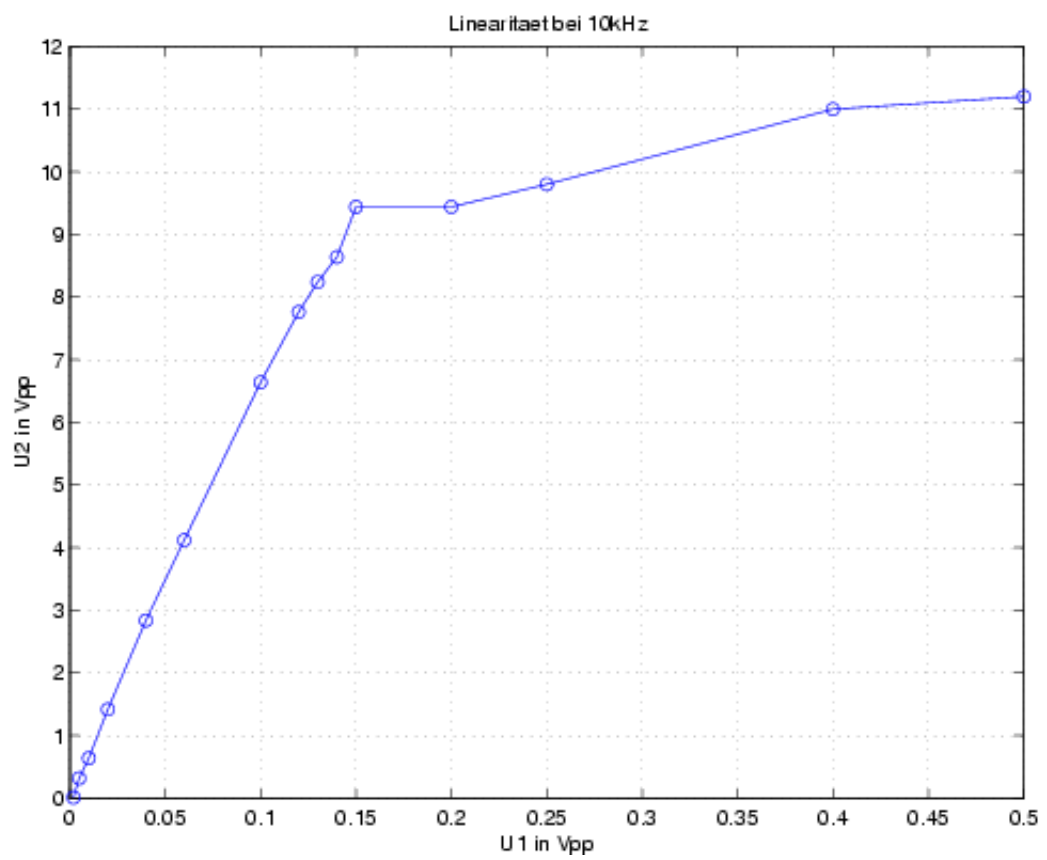


Abbildung 2.3: Linearität der Schaltung bei 10kHz

## 2.4 Impedanz und Verstärkung

Durch eine geeignete Messung bestimme man bei 1KHz und 10kHz folgende grössen:  $\bar{Z}_{ein}$ ,  $\bar{Z}_{aus}$ ,  $v_u$ ,  $v_i$ . Die gemessenen Grössen sind mit den unter Aufgabe 2.1 vorgegebenen und berechneten Werten zu vergleichen. Wie können eventuelle Abweichungen begründet werden?

$Z_{ein}$ : Um die Eingangsimpedanz zu bestimmen, schaltete ich einen Widerstand mit einem Wert von  $R_{mess} = 2.7k\Omega$  in Serie zum Eingang. Diesen Wert wählte ich möglichst ähnlich dem berechneten Wert um Messfehler zu vermeiden.

$$\bar{Z}_{ein_{1k}} = \frac{U_e * R_{mess}}{R'_e - R_e} = \frac{16.26e^{-10j}mV_{eff} * 2.7k\Omega}{24.75e^{0j}mV_{eff} - 16.26e^{-10j}mV_{eff}} = 4.7e^{-28j}k\Omega \quad (2.26)$$

$$\bar{Z}_{ein_{1k}} = 4.2k\Omega - 2.2jk\Omega \quad (2.27)$$

$$\bar{Z}_{ein_{10k}} = \frac{U_e * R_{mess}}{R'_e - R_e} = \frac{14.8e^{-3j}mV_{eff} * 2.7k\Omega}{24.75e^{0j}mV_{eff} - 14.8e^{-3j}mV_{eff}} = 4.0e^{-7.5j}k\Omega \quad (2.28)$$

$$\bar{Z}_{ein_{10k}} = 3.9k\Omega - 522\Omega \quad (2.29)$$

Die Abweichung vom gerechneten Wert  $R_{ein} = 2.5k\Omega$  begründe ich durch die Ungenauigkeit von  $r_{be}$  und  $\beta$ . Diese zwei Werte sind Transistor abhängig und sind Durchschnittswerte aus einem Datenblatt.

$Z_{aus}$ : Um die Ausgangsimpedanz zu bestimmen, schaltete ich einen Widerstand mit einem Wert von  $1k\Omega$  in Serie zum Ausgang und spies das das Signal rückwärts in die Schaltung ein ( $R_L = 0$  und  $U_e = 0$ ). Den Widerstandswert wählte ich möglichst ähnlich dem berechneten Wert von  $R_{aus}$  um Messfehler zu vermeiden.

$$\bar{Z}_{aus_{1k}} = \frac{U_a * R_{mess}}{R'_a - R_a} = \frac{24.4e^{-7j}mV_{eff} * 1k\Omega}{24.75e^{0j}mV_{eff} - 24.4e^{-7j}mV_{eff}} = 8.1e^{-86.2j}k\Omega \quad (2.30)$$

$$\bar{Z}_{aus_{1k}} = 442.5\Omega - 8.1jk\Omega \quad (2.31)$$

$$\bar{Z}_{aus_{10k}} = \frac{U_a * R_{mess}}{R'_a - R_a} = \frac{18.4e^{-21j}mV_{eff} * 1k\Omega}{24.75e^{0j}mV_{eff} - 18.4e^{-21j}mV_{eff}} = 1.8e^{-62.2j}k\Omega \quad (2.32)$$

$$\bar{Z}_{aus_{10k}} = 856.8\Omega - 1.6jk\Omega \quad (2.33)$$

Die gemessenen Werte entsprechen dem theoretischen  $R_{aus} = 1k\Omega$  ziemlich genau. Bei der theoretischen Betrachtung wurde allerdings das  $1/h_{oe}$  des Transistor nicht mitberücksichtigt was hier bei der Messung zu den Abweichungen beitragen kann.

$v_u$ : Aus Abbildung 2.4 liest man eine Spannungsverstärkung:

$$v_{u_{1k}} = \frac{u_2}{u_1} = \frac{-50dB}{-16dB} = 34dB \rightarrow 50.12 \quad (2.34)$$

$$v_{u_{10k}} = \frac{u_2}{u_1} = \frac{-50dB}{-13.5dB} = 36.7dB \rightarrow 68.4 \quad (2.35)$$

Eine Antwort auf die Differenz des zu erreichenden  $v_u = 100$  findet sich in der Aufgabe 2.5.

$v_i$ : Die Stromverstärkung kann rechnerisch aus Widerstand und Spannung ermittelt werden:

$$v_{i_{1k}} = \frac{i_2}{i_1} = \frac{u_2 * Z_{ein}}{u_1 * Z_{aus}} = \frac{-50dB * 4.2k\Omega}{-16dB * 442.5\Omega} = 29.6 \quad (2.36)$$

$$v_{i_{10k}} = \frac{i_2}{i_1} = \frac{u_2 * Z_{ein}}{u_1 * Z_{aus}} = \frac{-50dB * 3.9k\Omega}{-13.5dB * 856.8\Omega} = 16.9 \quad (2.37)$$

Rechnet man mit  $v_p = v_u * v_i$  so würde bei einer Spannungsverstärkung von  $v_u = 100$  das gewünschte  $v_i = 10$  erreicht werden. Diese Abweichungen sind also eine direkte Folge des ungenauen  $v_u$ .

## 2.5 Amplituden- und Frequenzgang

*Der in Aufgabe 2.1 berechnete Frequenzgang ist nun auszumessen und mit den theoretischen Resultaten zu vergleichen. Abweichungen zwischen praktischen und theoretischen Resultaten sind zu begründen*

Der Amplituden- und Phasengang der realen Schaltung ist in Abbildung 2.4 zu sehen. Zur Hilfe habe ich noch den idealen Verlauf mitgeplottet.

Die Abweichungen im Amplitudengang bei tiefen Frequenzen schliesse ich wie auch die Abweichungen bei hohen Frequenzen auf parasitäre Kapazitäten im Transistor zurück ( $C_{B'C}$  bei tiefen Frequenzen und  $C_{B'E}$  bei hohen Frequenzen). Dass die Verstärkung auch bei idealen Frequenzen nicht  $40dB$  erreicht ist wohl auf die Ungenauigkeit von  $R'_E$  zurückzuführen, da dieser mit einer Parallelschaltung aus verschiedenen Widerständen nachgebildet wurde.

## 2.6 DC-Einfluss von $R_E$

*Was für einen Einfluss hat die Variation von  $R_E = R'_E + R''_E$  auf die DC-Arbeitspunktstabilisierung?*

Auf die DC-Arbeitspunktstabilisierung hat die Variation von  $R_E = R'_E + R''_E$  keinen Einfluss, da  $C_E$  nur einen AC-Einfluss hat.

## 2.7 AC-Einfluss von $R_E$

*Was für einen Einfluss hat  $R'_E$  auf die Spannungsverstärkung? Beeinflusst auch  $R''_E$  die Spannungsverstärkung? Wenn ja, bei welchen Frequenzen?*

$R'_E$  hat auf die Spannungsverstärkung einen direkten Einfluss. Die Spannungsverstärkung berechnet sich mit der Formel (2.38).

Aber auch  $R''_E$  beeinflusst die Spannungsverstärkung bei gewissen Frequenzen, da er parallel zu  $C_{CE}$  liegt (2.38). Wegen dem  $x_{CE}$ , welches bei  $10Hz$  schon  $228\Omega$  beträgt ( $100Hz \rightarrow 22.8\Omega$ ;  $1kHz \rightarrow 2.3\Omega$ ) wird das  $v_u$  bis ca.  $100Hz$  beeinflusst:

Frequenz:	$v_U$ :
$10Hz$	94
$100Hz$	99
$1kHz$	100
$10kHz$	100

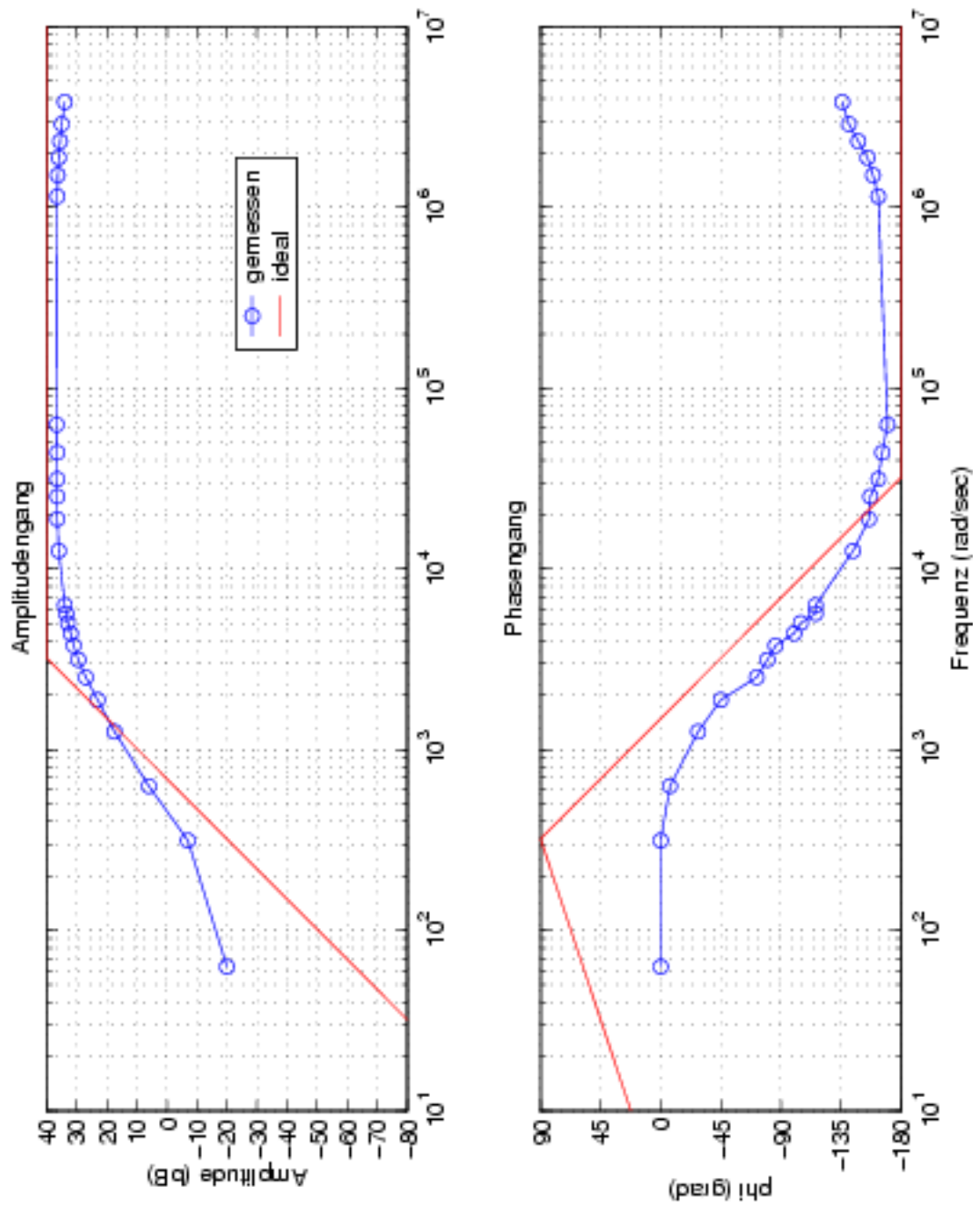


Abbildung 2.4: Amplituden und Phasengang

$$v_u = \frac{-\beta_0 * R_C}{r_{BE} + (1 + \beta_0)R'_E + R''_E \parallel \frac{1}{j\omega C_E}} \quad (2.38)$$



# Anhang A

## Messmittel

DB-Voltmeter: Helwet Packard 400E  
1mW 600 Ohm  
536-08197 / 536-08323

Function Generator: Stanford Research Systems DS 345  
50 Ohm  
26367

KO: Metrix OX 8100  
149587WHF

Multimeter: Helwet Packard 34401A  
3146A30213

# Literaturverzeichnis

- [1] Kories / Schmidt-Walter. *Taschenbuch der Elektrotechnik*. Harri Deutsch ISBN: 3-8171-1563-6, 1998.
- [2] U. Tietze / Ch. Schenk. *Halbleiter-Schaltungstechnik*. Springer ISBN: 3-540-64192-0, 1999.