



Elektronik 2
Praktikum 1

2021

Differenzverstärker

27. April 2021

Florian Tietjen

Torsten Möller

Eric Antosch

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	2
1 Grundsaltung eines Differenzverstärkers	3
1.1 Dimensionierung des R_E -Widerstands	3
2 Differenzverstärkung	4
3 Gegen- und Gleichtaktverstärkung	6
3.1 Gegentaktverstärkung	6
3.2 Gleichtaktverstärkung	7
3.3 Auswertung der Gegen- und Gleichtaktverstärkung	7
3.3.1 Gegentaktverstärkung	7
3.3.2 Gleichtaktverstärkung	7
3.4 Gleichtaktunterdrückung	8
4 Wechselspannungsverstärker	9
4.1 Simulation der Schaltung	9
4.2 Simulation Wechselspannungsverstärkung	11
4.3 Eingangswiderstand der Schaltung	12
4.4 Ausgangswiderstand der Schaltung	14
4.5 AC-Analyse der Schaltung	16
5 Literatur	16

Abbildungsverzeichnis

1	Grundsaltung der Differenzverstärker	3
2	Versuchsaufbau	4
3	Darstellung der Kollektorströme gegen die Differenzspannung U_d	5
4	Anlegung der Cursor an die entsprechenden Punkte (siehe Slope)	5
5	Versuchsaufbau des Netzwerkes	6
6	Ein- und Ausgangsspannung	6
7	Ein- und Ausgangsspannung	7
8	Schaltplan für den Versuchsaufbau	9
9	Messwerte aus LTSpice	11
10	Messwerte aus der Simulation	11
11	Schaltplan für die Messung 4.3	12
12	Messung für 4.3	13
13	Aufbau der Schaltung für 4.4	14
14	Messung für 4.4	15
15	Messung der AC-Analyse	16

2 Differenzverstärkung

Aufgabe 2.0

In dieser Aufgabe wollen wir die Differenzverstärkung unserer Grundsaltung ermitteln, indem wir den linken Transistor nun von einer Spannungsquelle ansteuern lassen.

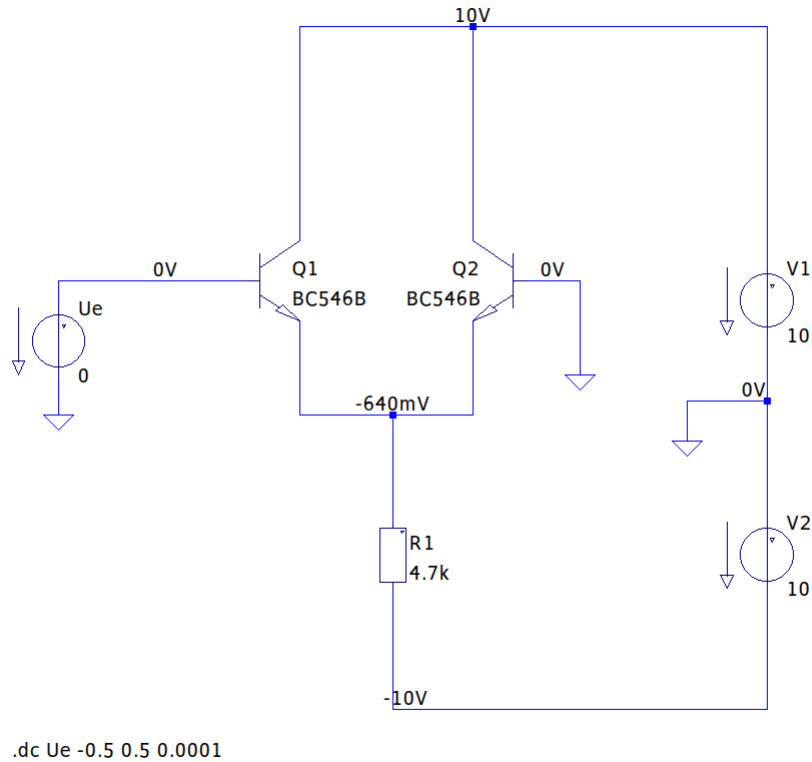


Abbildung 2: Versuchsaufbau

Wir nutzen nun die DC-Sweep-Analyse von LTSpice um die Spannung der U_e -Quelle linear von $-0,5V$ bis $0,5V$ wachsen zu lassen. Aus der Vorlesung kennen wir die Bedeutung von U_d , welches die Differenz der Potentiale an den Basen der beiden Transistoren darstellt. [1]

$$I_{C1} = \frac{2 \cdot I_0}{1 + e^{-\frac{U_d}{U_T}}} \quad (2)$$

$$I_{C2} = \frac{2 \cdot I_0}{1 + e^{+\frac{U_d}{U_T}}} \quad (3)$$

Tragen wir nun die Ströme durch die beiden Transistoren gegen die Differenzspannung U_d ab, so entsteht folgendes Bild:

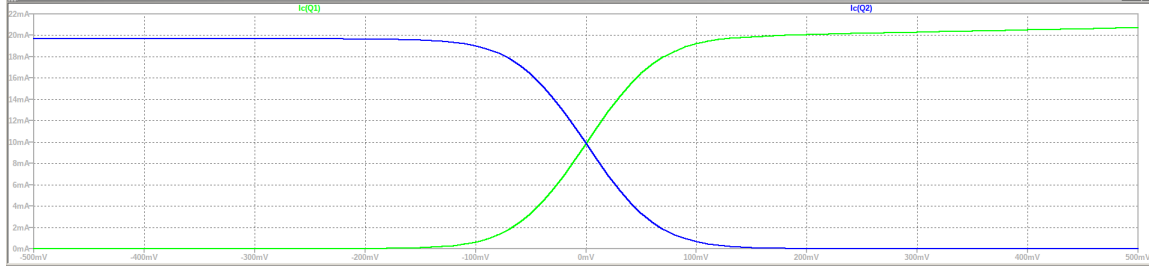


Abbildung 3: Darstellung der Kollektorströme gegen die Differenzspannung U_d

Wir erkennen sowohl eine ziemlich genaue Übereinstimmung der Diagramme aus der Vorlesung als auch aus den Praktikumsaufgaben. Bei einer Differenzspannung von $U_d = 0V$ erhalten wir zudem unsere $I_C = 1mA$, die wir in Aufgabe 1 bereits verwendet haben.

Wir wollen nun noch einmal die Steilheit der Schaltung im Arbeitspunkt berechnen. Dafür legen wir bei dem Punkt $U_d = 0V$ ein Steigungsdreieck an, da:

$$S_{1,2} = \pm \frac{dI_{C1,2}}{dU_d} \quad (4)$$

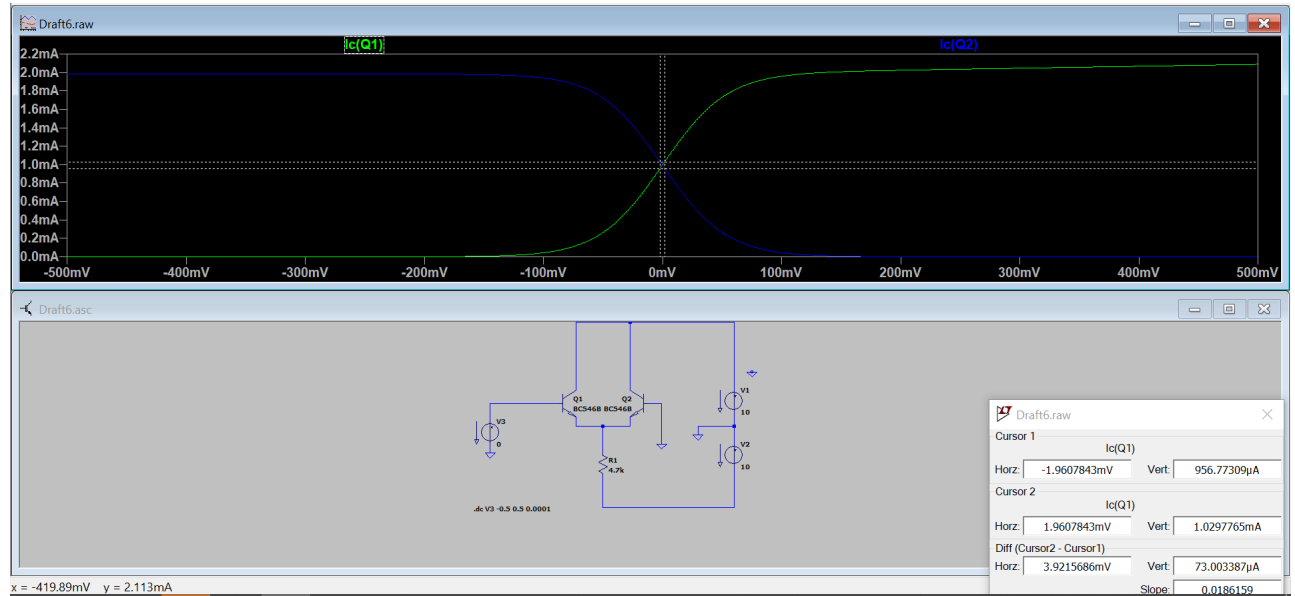


Abbildung 4: Anlegung der Cursor an die entsprechenden Punkte (siehe Slope)

Wie auf dem Bild unten links zu erkennen ist, bekommen wir eine Steigung von ungefähr $S_{1,2} = \pm 0,0186 \frac{A}{V}$. Berechnen wir mithilfe der aus der Vorlesung gegebenen Formel, so ergibt sich [1]:

$$S_{1,2} = \pm \frac{I_{C0}}{2 \cdot U_T} = \pm 0,02 \frac{A}{V} \quad (5)$$

Die Werte liegen also, wie sich leicht erkennen lässt, nicht weit auseinander und die Abweichung ist wahrscheinlich durch Ungenauigkeiten beim Messen oder durch Rundungen beim Rechnen entstanden.

3 Gegen- und Gleichtaktverstärkung

Aufgabe 3.0

Nun werden in den Kollektorzweigen der Transistoren Widerstände R_{C1} und R_{C2} von jeweils $1k\Omega$ ergänzt. Ziel des Versuchs ist die Untersuchung der Gegen- und Gleichtaktverstärkung sowie der Vergleich der Messergebnisse mit den theoretischen Berechnungen.

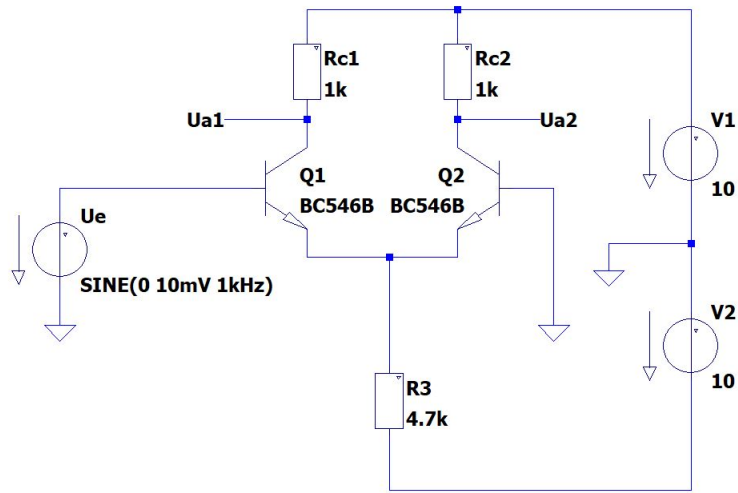


Abbildung 5: Versuchsaufbau des Netzwerkes

3.1 Gegentaktverstärkung

Um die reine Wechselspannung darstellen zu lassen, werden die Gleichanteile der Spannung subtrahiert. Im Labor geschieht dies durch die Messung in AC-Kopplung. In LTSpice könnte dafür entweder ein in Reihe geschalteter Kondensator helfen oder es wird wie eben genannt der Mittelwert subtrahiert.

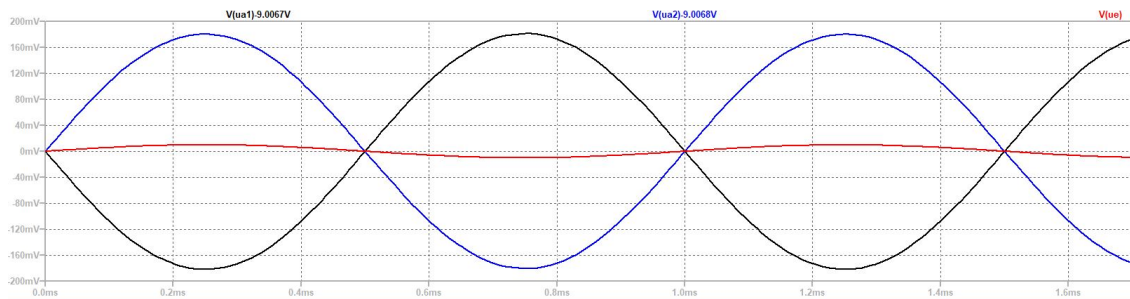


Abbildung 6: Ein- und Ausgangsspannung

3.2 Gleichtaktverstärkung

Nun werden die Basen der Transistoren miteinander verbunden. Dabei wird die Eingangsspannung soweit erhöht bis die gleiche Ausgangsspannung wie beim Vorversuch erreicht wird. Die ermittelte Eingangsspannung liegt hier bei $\hat{u}_e = 1,7V$.



Abbildung 7: Ein- und Ausgangsspannung

Die Ausgangsspannungen liegen nun genau übereinander, weshalb nur ein Signal erkennbar ist. Dies war zu erwarten, da die Basen miteinander verbunden sind und damit der Kollektorstrom gleich gesteuert wird.

3.3 Auswertung der Gegen- und Gleichtaktverstärkung

3.3.1 Gegentaktverstärkung

Aus den Messwerten werden die beiden Gleichtaktverstärkungen $v_{u_{d1}}$ und $v_{u_{d2}}$ bestimmt:

$$v_{u_{d1}} = -\frac{u_{a1}}{u_e} = -\frac{180mV}{10mV} = -18$$

$$v_{u_{d2}} = \frac{u_{a2}}{u_e} = -\frac{180mV}{10mV} = 18$$

Vergleich der berechneten Gegentaktverstärkung $v_{u_{d1}}$ und $v_{u_{d2}}$ aus der Steilheit:

$$v_{u_{d1}} = -\frac{1}{2} \cdot S \cdot R_C = -\frac{1}{2} \cdot 0,038 \frac{A}{V} \cdot 1k\Omega = -19$$

$$v_{u_{d2}} = +\frac{1}{2} \cdot S \cdot R_C = -\frac{1}{2} \cdot 0,038 \frac{A}{V} \cdot 1k\Omega = 19$$

3.3.2 Gleichtaktverstärkung

Nun wird aus den Messungen die Gleichtaktverstärkung $v_{u_{gl1}}$ und $v_{u_{gl2}}$ bestimmt:

$$v_{u_{gl1}} = -\frac{u_{a1}}{u_e} = -\frac{180mV}{1,7V} = -0,105$$

$$v_{u_{gl2}} = \frac{u_{a2}}{u_e} = -\frac{180mV}{1,7V} = 0,105$$

Nach der theoretischen Berechnung sollten folgende Werte sich ergeben:

$$v_{u_{gl}1} = -\frac{R_C}{2 \cdot R_E} = -\frac{1k\Omega}{2 \cdot 4,7k\Omega} = -0,106$$
$$v_{u_{gl}2} = -\frac{R_C}{2 \cdot R_E} = -\frac{1k\Omega}{2 \cdot 4,7k\Omega} = -0,106$$

Auch hier gibt es minimale Abweichung, die darauf zurückzuführen sind, dass unsere Ansätze bei der Berechnung immer vereinfachte Rechnungen sind, so wird beispielsweise der Early-Effekt vernachlässigt. LTSpice jedoch arbeitet mit sehr genauen numerischen Verfahren, so dass die Messergebnisse von den berechneten Werten abweichen können.

3.4 Gleichtaktunterdrückung

Aus den Messwerten ergibt sich eine Gleichtaktunterdrückung von:

$$CMRR_1 = G = \left| \frac{v_{u_d} i}{v_{u_{gl}}} \right| = S \cdot R_E = 0,038 \frac{A}{V} \cdot 4,7k\Omega = 178,6$$
$$CMRR_2 = G = \left| \frac{v_{u_d} i}{v_{u_{gl}}} \right| = S \cdot R_E = 0,038 \frac{A}{V} \cdot 4,7k\Omega = 178,6$$

Theoretisch soll die Gleichtaktunterdrückung bei folgenden Werten liegen:

$$CMRR_1 = G = \left| \frac{v_{u_d} i}{v_{u_{gl}}} \right| = \frac{18}{0,105} = 169,8$$
$$CMRR_2 = G = \left| \frac{v_{u_d} i}{v_{u_{gl}}} \right| = \frac{18}{0,105} = 169,8$$

4 Wechselspannungsverstärker

Aufgabe 4.0

In dieser Aufgabe wollen wir die Wechselspannungsverstärkung, die dem Differenzverstärker zugrunde liegt untersuchen.

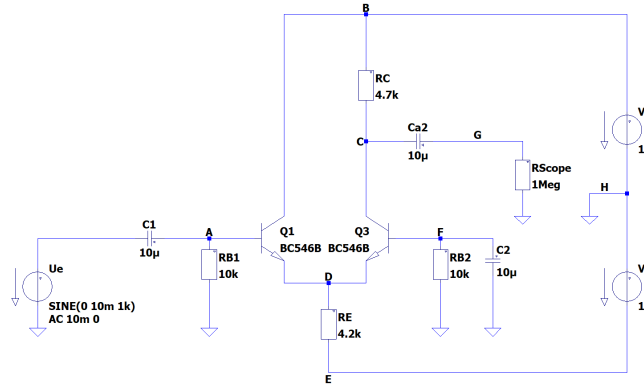


Abbildung 8: Schaltplan für den Versuchsaufbau

Vorbereitung

Aus der gegebenen Spannungsverstärkung von ca. 40dB errechnen wir nun den Emitterwiderstand R_E :

$$v_u = \frac{1}{2} \cdot S \cdot R_C = 40\text{dB} = 100 \text{ mit } S = \frac{I_{C_0}}{U_T} \quad (6)$$

Und damit erkennen wir, dass:

$$100 = \frac{I_{C_0} \cdot R_C}{2 \cdot U_T} \quad (7)$$

Wir wollen nun zunächst den Wert für I_{C_0} berechnen:

$$I_{C_0} = \frac{100 \cdot 2 \cdot U_T}{R_C} = \frac{100 \cdot 2 \cdot 26\text{mV}}{47\text{k}\Omega} = 1,1\text{mA} \quad (8)$$

Wir stellen nun die betreffende Masche auf, um den Widerstandswert von R_E zu berechnen und erhalten:

$$0\text{V} = U_{BE} - U_B + R_E \cdot I_0 \quad (9)$$

Wir stellen nun die Gleichung nach R_E um und bekommen:

$$R_E = \frac{U_B - U_{BE}}{I_{C_0}} = \frac{10\text{V} - 0,7\text{V}}{2,2\text{mA}} = 4227\Omega. \quad (10)$$

Aus der E12-Reihe wählen wir nun $2 \cdot 1\text{k}\Omega$ und $1 \cdot 2,2\text{k}\Omega$, womit wir auf $4,2\text{k}\Omega$ kommen.

4.1 Simulation der Schaltung

Wir wollen nun die Schaltung im berechneten Arbeitspunkt simulieren und die Gleichspannungspotentiale an den Punkten A-H auslesen.

Messpunkt	Spannung (RMS)	Spannung (Mittelwert)
A	35,66mV	-34,952mV
B	10V	10V
C	5,0215V	4,9793V
D	673,4mV	-673,39mV
E	10V	10V
F	34,937mV	-34,937mV
G	649,62mV	-5,7671mV
H	0V	0V

Tabelle 1: Messpunkte aus LTSpice

Aus den oben stehenden Messwerten werden wir nun die Basisströme, Kollektorströme und ihre Stromverstärkung berechnen:

$$\begin{aligned}I_{C_2} &= \frac{B - C}{R_C} = \frac{10V - 4,98V}{4,7k\Omega} = 1,068mA \\I_0 &= \frac{D - E}{R_E} = \frac{-0,673V + 10V}{4,2k\Omega} = 2,22mA \\I_{C_1} &= I_0 - I_{C_2} = 2,22mA - 1,068mA = 1,152mA \\I_{B_1} &= \frac{A}{R_{B_1}} = \frac{0,035V}{10k\Omega} = 3,5\mu A \\I_{B_2} &= \frac{F}{R_{B_2}} = \frac{0,035V}{10k\Omega} = 3,5\mu A \\B_1 &= \frac{I_{C_1}}{I_{B_1}} = \frac{1,152mA}{3,5\mu A} = 329,1 \\B_2 &= \frac{I_{C_2}}{I_{B_2}} = \frac{1,068mA}{3,5\mu A} = 305,1\end{aligned}$$

Die berechneten Ströme stimmen sehr genau mit den Strömen, die LTSpice berechnet überein:

```

--- Operating Point ---
V(a) :      -0.0349263    voltage
V(d) :      -0.673595    voltage
V(e) :      -10          voltage
V(f) :      -0.0349477    voltage
V(b) :      10           voltage
V(c) :      4.98507       voltage
V(g) :      4.98507e-011   voltage
V(n001) :      0          voltage
Ic(Q2) :      0.00106701   device_current
Ib(Q2) :      3.49477e-006   device_current
Ie(Q2) :      -0.0010705   device_current
Ic(Q1) :      0.00114658   device_current
Ib(Q1) :      3.49263e-006   device_current
Ie(Q1) :      -0.00115007   device_current
I(C1) :      -3.49263e-019   device_current
I(Ca2) :      -4.98507e-017   device_current
I(C2) :      -3.49477e-019   device_current
I(Rscope) :      4.98507e-017   device_current
I(Rc) :      0.00106701   device_current
I(Rb2) :      -3.49477e-006   device_current
I(Re) :      0.00222057   device_current
I(Rb1) :      -3.49263e-006   device_current
I(Ue) :      -3.49263e-019   device_current
I(V2) :      -0.00222057   device_current
I(V1) :      -0.00221359   device_current

```

Abbildung 9: Messwerte aus LTSpice

4.2 Simulation Wechsellspannungsverstärkung

In der nächsten Teilaufgabe wollen wir nun eine Simulation mit $\hat{u}_e = 10\text{mV}$ und $f = 1\text{kHz}$ machen und dann die Wechsellspannungsverstärkung ermitteln. Diese wollen wir dann mit der theoretischen Wechsellspannungsverstärkung vergleichen.

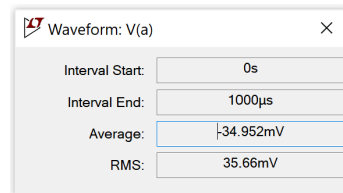
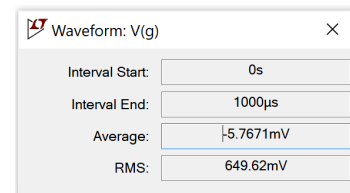
(a) Eingangsspannung u_e (b) Ausgangsspannung u_a

Abbildung 10: Messwerte aus der Simulation

Wir berechnen zunächst einmal den Wert aus der Simulation:

$$u = \sqrt{u_{EFF}^2 - u_-^2} \quad (11)$$

$$u_e = \sqrt{(35,66\text{mV})^2 - (-34,952\text{mV})^2} = 7,07\text{mV}$$

$$u_a = \sqrt{(649,62\text{mV})^2 - (-5,7671\text{mV})^2} = 649,59\text{mV}$$

Nun errechnen wir aus den beiden oberen Werten die Wechsellspannungsverstärkung:

$$v_u = \frac{u_a}{u_e} = \frac{649,59\text{mV}}{7,07\text{mV}} = 91,88. \quad (12)$$

Wir erkennen, dass dieser Wert nicht extrem weit weg von unserem angestrebten Wert von 100 liegt. Abweichungen können sowohl durch Rundungen, Bauteilabweichungen/-ungenauigkeiten oder durch numerische Verfahren entstehen.

4.3 Eingangswiderstand der Schaltung

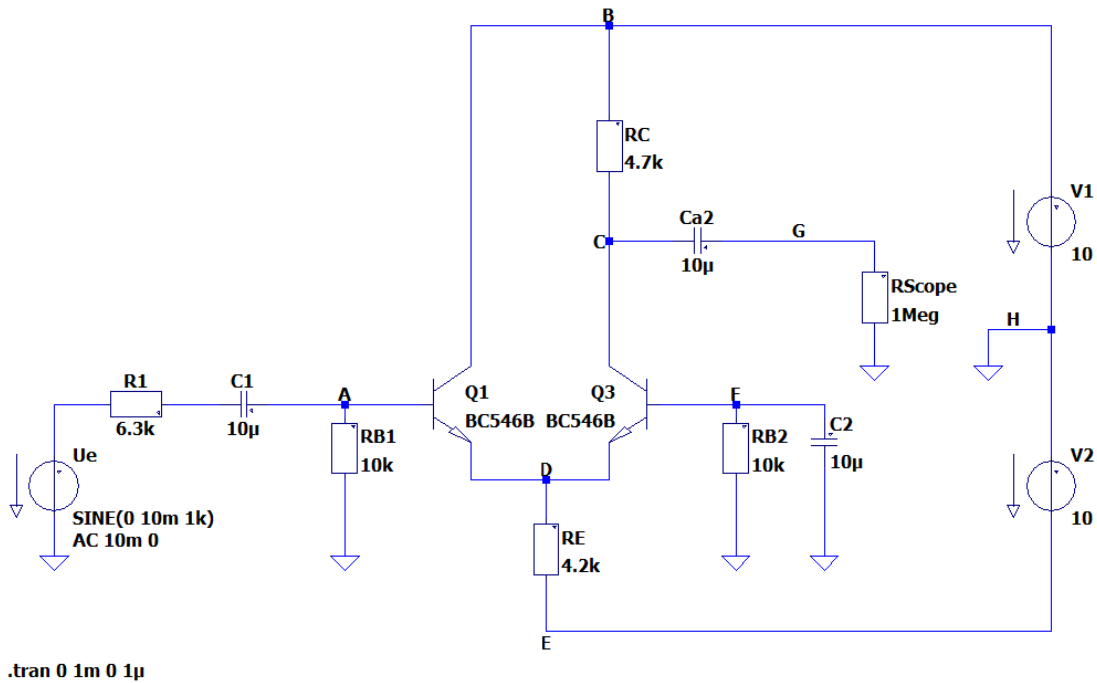


Abbildung 11: Schaltplan für die Messung 4.3

Im nächsten Teilversuch vergleichen wir den Eingangswiderstand der Schaltung, den wir mithilfe einer Formel aus der Vorlesung berechnen können und dem Eingangswiderstand der Schaltung, die wir mittels der Halbausschlagsmethode ermitteln können.

Dazu berechnen wir zuerst einmal den Eingangswiderstand über:

$$r_{in} = R_B || (2 \cdot r_{BE}) \quad (13)$$

$$\frac{R_B \cdot 2 \cdot r_{BE}}{R_B + 2 \cdot r_{BE}} = \frac{10k\Omega \cdot 2 \cdot 4,2k\Omega}{10k\Omega + 2 \cdot 4,2k\Omega} = 4,565k\Omega$$

Wir wollen nun die Halbausschlagmethode nutzen, um einen entsprechenden Vergleichswert zu bekommen:

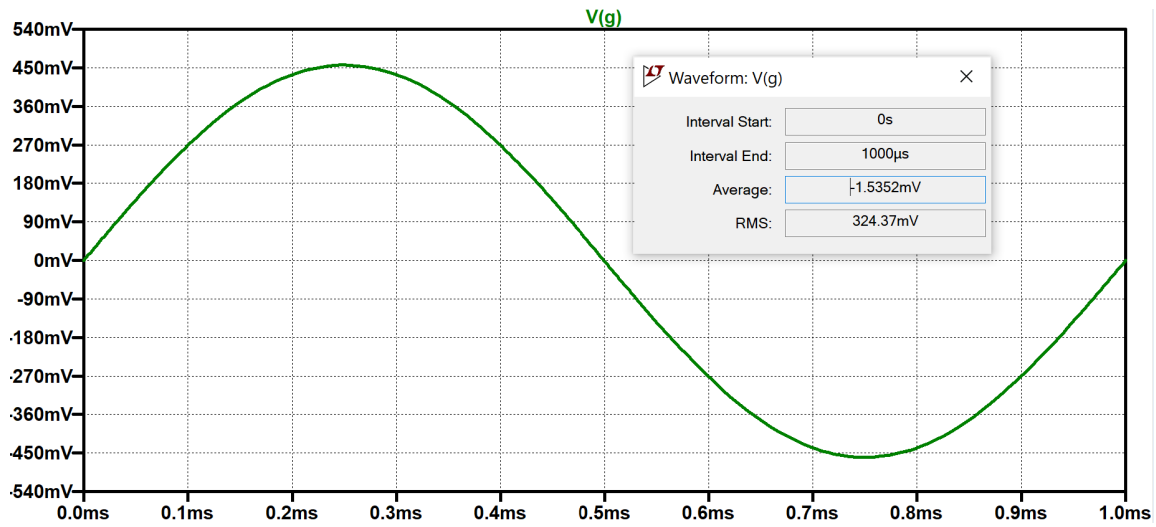


Abbildung 12: Messung für 4.3

Wir erkennen, dass der Wert aus der Simulation erhöht ist und etwa $6,3k\Omega$ beträgt.

4.4 Ausgangswiderstand der Schaltung

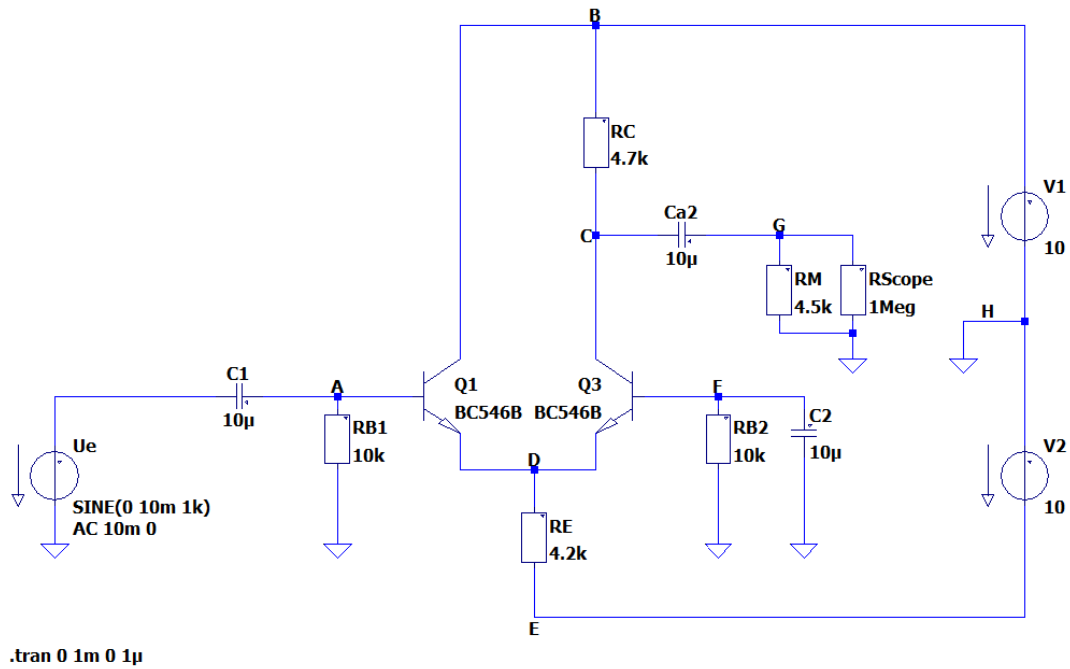


Abbildung 13: Aufbau der Schaltung für 4.4

Im vorletzten Versuch wiederholen wir nun den vorigen Vorgang, wobei wir uns hier jedoch auf den Ausgangswiderstand beziehen. Wir wollen also wieder zunächst den Ausgangswiderstand theoretisch beschreiben und ihn dann mithilfe der Simulation praktisch ermitteln:

$$r_{aus} \approx R_C = 4,7k\Omega$$

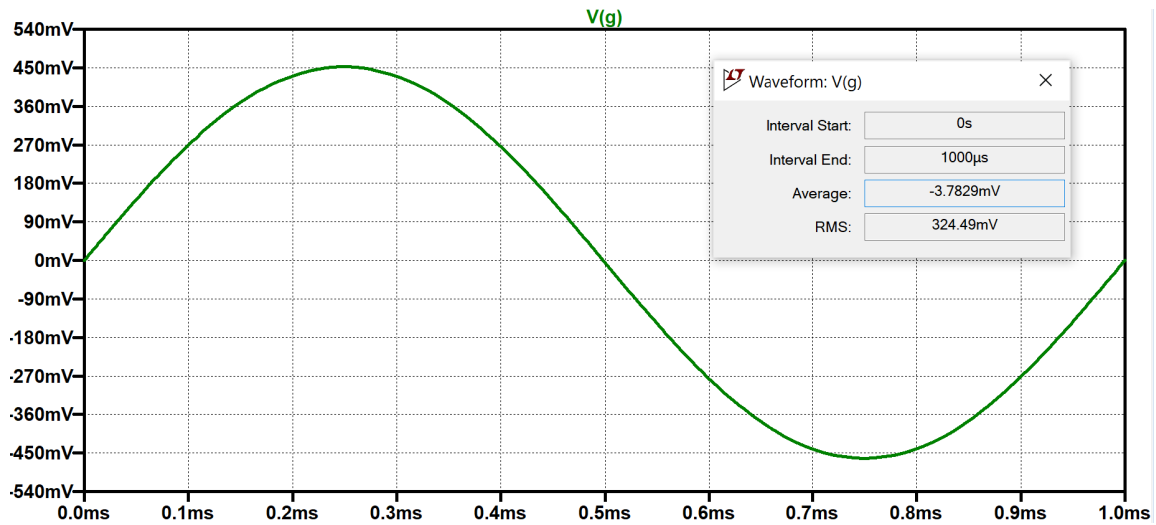


Abbildung 14: Messung für 4.4

Mit der Simulation ermitteln wir dann allerdings einen Wert von ca. $4,5k\Omega$. Dieser Wert ist nur leicht geringer als erwartet und entspricht im Groben den Erwartungen.

In beiden Versuchen haben wir die Halbspannungsmethode verwendet. Wir ermitteln damit, welchen Ein- bzw. Ausgangswiderstand die Schaltung hat. Dabei erhöhen wir unseren Messwiderstand R_M solange, bis ungefähr die Hälfte der Spannung über unseren R_M abfällt. Der R_M hat dann den gleichen Spannungswert wie unser gesuchter Widerstand, weil sich dann die Spannung über beide Widerstände, die dann in Reihe sind, gleichmäßig im Verhältnis 1:1 aufteilt. Wir wissen nämlich, aus dem Ohm'schen Gesetz, dass wenn wir $U = R \cdot I$ nehmen, und Spannung U und Strom I , denn die Widerstände sind in Reihe, gleich sind, auch der Widerstandswert R für beide Widerstände identisch sein muss.

4.5 AC-Analyse der Schaltung

Wir führen im letzten Schritt eine AC-Analyse im Bereich $f = 10\text{Hz} \dots 10\text{MHz}$ durch und stellen den Vorgang als Graph nach Frequenz und Spannungsverstärkung in halblogarithmischer Skalierung dar:

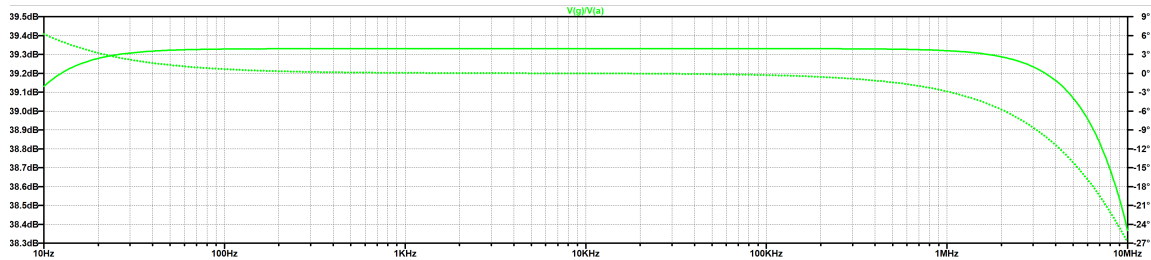


Abbildung 15: Messung der AC-Analyse

5 Literatur

[1] Prof.Dr.Björn Lange. *Elektronik II Skript*. HAW, 2019.