

Physikalisches Anfängerpraktikum (P2)

P2-61: Operationsverstärker

Auswertung

Matthias Ernst
Matthias Faulhaber

Karlsruhe, den 16.12.2009

Durchführung: 09.12.2009

1 Transistor in Emitterschaltung

1.1 Transistorverstärker (gleichstromgegekoppelt)

In diesem Versuch haben wir einen Transistor in der in der Vorbereitung angegebenen Emitterschaltung aufgebaut. Da keine $5\mu\text{F}$ -Kondensatoren zur Verfügung standen, verwendeten wir für C_1 und C_2 Kondensatoren zu $4,7\mu\text{F}$.

Um zunächst die Verstärkung des Transistors zu messen, legten wir $+15\text{V}$ an seinen Collector und nahmen bei Eingangssignalen unterschiedlicher Amplitude sein Ausgangssignal auf. Wir erhielten folgende Messwerte:

U_{SS}^{Ein}	U_{SS}^{Aus}	Verstärkung v_U^{Trans}
45mV_{SS}	3950mV_{SS}	87,78
124mV_{SS}	10200mV_{SS}	82,26
78mV_{SS}	6300mV_{SS}	80,77

Daraus ergibt sich für die Verstärkung durch den Transistor ein Mittelwert von $v_U^{\text{Trans}} = 83,60$.

Um auch den Arbeitspunkt des Transistors zu bestimmen, haben wir die Spannung zwischen Basis und GND gemessen und erhielten einen Wert von $U=2,270\text{V}$. Aufgrund der verwendeten Widerstände erwarteten wir eine Spannung von $U = 15\text{V} \cdot \frac{1\text{k}\Omega}{6,5\text{k}\Omega} \approx 2,308\text{V}$. Die Differenz ist wohl auf kleine Abweichungen der Eingangsspannung und der verwendeten Widerstände zurückzuführen.

1.2 Bestimmung der Verstärkung

In diesem Aufgabenteil haben wir eine Dreiecksspannung mit einer Frequenz von $f = 1\text{kHz}$ an den Eingang gelegt. Bei verschiedenen Ausgangsspannungen haben wir dann das entsprechende Eingangssignal gemessen und so die Verstärkung unserer Schaltung bestimmt. Wir erhielten die folgenden Werte:

U_{SS}^{Aus}	U_{SS}^{Ein}	Verstärkung $v_U^{\text{Emitt, mit}}$
$4000,0\text{mV}_{SS}$	$27,5\text{mV}_{SS}$	145,45
$9000,0\text{mV}_{SS}$	$62,0\text{mV}_{SS}$	145,16

Daraus ergibt sich für die Verstärkung der Schaltung ein Mittelwert von $v_U^{\text{Emitt, mit}} = 145,31$.

Die Schaltung gab das Eingangssignal (Dreiecksspannung) etwas verschlechtert wieder (leichte Sägezahnspannung). Es war jedoch keine Verzögerung oder größere Verzerrung des Signals zu erkennen.

1.3 Verstärkung ohne Emitterkondensator C_E (stromgegekoppelt)

In diesem Teil der Aufgabe entfernen wir den Emitterkondensator C_E aus unserer Schaltung und bestimmen wieder die Verstärkung der Schaltung wie im vorherigen Versuchsteil 1.2; auch hier mit $f = 1\text{kHz}$. Hierbei erhielten wir folgende Messwerte:

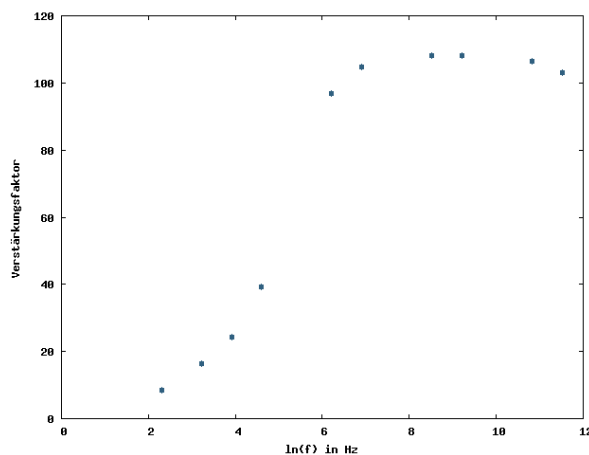
U_{SS}^{Aus}	U_{SS}^{Ein}	Verstärkung $v_U^{\text{Emitt, ohne}}$
200mV _{SS}	52mV _{SS}	3,8
800mV _{SS}	205mV _{SS}	3,9

Daraus ergibt sich für die Verstärkung der Schaltung ein Mittelwert von $v_U^{\text{Emitt, ohne}} = 3,9$. Wie in unserer Vorbereitung beschrieben, erwarteten wir eine Verstärkung von $v_U = 4,7$. Die große Abweichung ist ungewöhnlich, aber wohl wiederum auf Abweichungen der gegebenen Bauteile sowie der Mess- und Netzgeräte zurückzuführen.

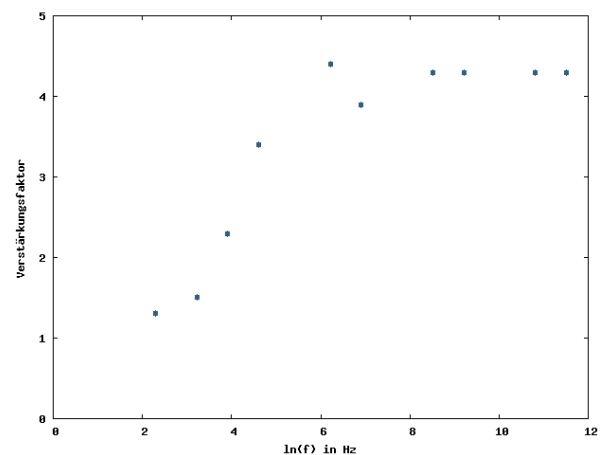
1.4 Frequenzabhängigkeit der Verstärkung

In diesem Aufgabenteil haben wir die Verstärkung der strom- und der gleichstromgegekoppelten Schaltung bei verschiedenen Frequenzen gemessen. Die Eingangsspannung versuchten wir, dabei möglichst konstant zu belassen. Da sie jedoch bei Variation der Frequenz stets nachgeregelt werden muss, geben wir sie auch zu jedem unserer Messwerte erneut an.

f	U_{SS}^{Aus}	U_{SS}^{Ein}	$v_U^{\text{Emitt, mit}}$	U_{SS}^{Aus}	U_{SS}^{Ein}	$v_U^{\text{Emitt, ohne}}$
10 Hz	420 mV _{SS}	50 mV _{SS}	8.4	190 mV _{SS}	152 mV _{SS}	1.3
25 Hz	1040 mV _{SS}	64 mV _{SS}	16.3	305 mV _{SS}	200 mV _{SS}	1.5
50 Hz	1650 mV _{SS}	68 mV _{SS}	24.3	460 mV _{SS}	200 mV _{SS}	2.3
100 Hz	2550 mV _{SS}	65 mV _{SS}	39.2	670 mV _{SS}	200 mV _{SS}	3.4
500 Hz	6000 mV _{SS}	62 mV _{SS}	96.8	880 mV _{SS}	200 mV _{SS}	4.4
1 kHz	6500 mV _{SS}	62 mV _{SS}	104.8	800 mV _{SS}	205 mV _{SS}	3.9
5 kHz	6700 mV _{SS}	62 mV _{SS}	108.1	880 mV _{SS}	205 mV _{SS}	4.3
10 kHz	6700 mV _{SS}	62 mV _{SS}	108.1	880 mV _{SS}	205 mV _{SS}	4.3
50 kHz	6600 mV _{SS}	62 mV _{SS}	106.5	880 mV _{SS}	205 mV _{SS}	4.3
100 kHz	6400 mV _{SS}	62 mV _{SS}	103.2	880 mV _{SS}	205 mV _{SS}	4.3



(a) Gleichstromgegekoppelte Schaltung



(b) Stromgegekoppelte Schaltung (ohne C_E)

Abbildung 1: Frequenzabhängige Verstärkung der Emitterschaltung

Wie erwartet, werden durch die Kondensatoren C_1 und C_2 niedrige Frequenzen nur gering verstärkt. Man kann gut erkennen, dass beim gleichstromgegekoppelten Aufbau die Verstärkung bei hohen Frequenzen stark ansteigt.

Bei niedrigen Frequenzen ist anzumerken, dass sowohl beim Ein- als auch beim Ausgangssignal ungewöhnlich starke Verzerrungen vorlagen.

2 Nichtinvertierende Grundsaltung eines Operationsverstärkers

2.1 Nichtinvertierende Grundsaltung eines OPV mit $v_U \approx 10$

Hier haben wir zunächst die Schaltung des nichtinvertierenden OPV auf dem Schaltboard aufgebaut und sie zuerst auf ihre Funktion hin überprüft. Wir erwarteten, eine Verstärkung von $v_U = \frac{R_2}{R_1} + 1 = \frac{10k\Omega}{1k\Omega} + 1 = 11$ zu erreichen. Mit unseren Messwerten von $U_E = 0,10V_{SS}$ und $U_A = 0,96V_{SS}$ ergibt sich die Verstärkung zu $v_U = 9,6$. Der Wert weicht zwar durch die Fehler von Bauteilen und Versorgungsspannung leicht vom erwarteten ab, erfüllt jedoch sehr gut den angestrebten Wert von $v_U = 10$.

2.2 Eingangs- und Ausgangswiderstand

Hier wollten wir demonstrieren, dass der Eingangswiderstand eines OPV sehr groß, und der Ausgangswiderstand eines OPV sehr klein ist.

Um zunächst den Eingangswiderstand zu bestimmen, schalteten wir, wie in der Vorbereitung beschrieben, einen Widerstand $R_M = 1M\Omega$ in Reihe vor den Eingang des OPV. Die an ihm abfallende Spannung bestimmten wir zu $U_M = 34,6mV_{SS}$, die Eingangsspannung zu $U_E = 100,0mV_{SS}$. Somit ergibt sich der Eingangswiderstand zu $R_E = \left(\frac{U_E}{U_M} - 1\right) \cdot R_M = 1,89M\Omega$.

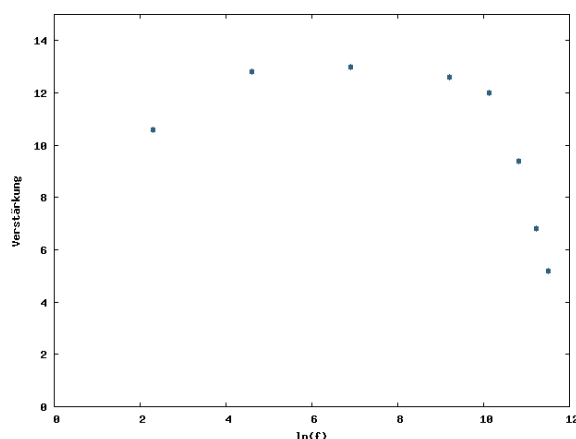
Wie erwartet ist der Eingangswiderstand also sehr groß.

Da sich das Potentiometer zur Bestimmung des Ausgangswiderstands nicht eignete ($R_{min}^{Poti} = 100\Omega$), verwendeten wir Widerstände von $R_\alpha = 100\Omega$, $R_\beta = 33\Omega$ und $R_\gamma = 2\Omega$. Durch Parallelschalten der Widerstände war uns nun eine Abschätzung möglich (Methode siehe Vorbereitung). Bei R_α war nur ein geringes Absinken von U_A erkennbar. R_β ließ die Spannung hingegen um mehr als die Hälfte sinken, während $R_\beta + R_\gamma = 35\Omega$ einen ebenfalls zu geringen Widerstand darstellte. Wir schätzen auf unsere Beobachtungen hin den Ausgangswiderstand des OPV zu $R_A \approx 40\Omega$.

2.3 Frequenzabhängigkeit der Verstärkung

In diesem Teilversuch wollten wir die Verstärkung auf ihre Frequenzabhängigkeit hin untersuchen. Dazu legten wir an den OPV eine Wechselspannung von $U_E = 0,5V_{SS}$ an. Die Frequenz dieser Spannung variierten wir und erwarteten aufgrund der Rückkopplung, bei hohen Frequenzen einen starken Abfall der Verstärkung beobachten zu können. Wir erhielten folgende Messwerte:

f	U_{SS}^{Aus}	$v_U^{Nichtinv}$
10 Hz	5,3 V_{SS}	10,6
100 Hz	6,4 V_{SS}	12,8
1 kHz	6,5 V_{SS}	13
10 kHz	6,3 V_{SS}	12,6
25 kHz	6 V_{SS}	12
50 kHz	4,7 V_{SS}	9,4
75 kHz	3,4 V_{SS}	6,8
100 kHz	2,6 V_{SS}	5,2



(a) Messwerte

(b) Auftragung $v_U^{Nichtinv}$ über $\ln(f)$

Abbildung 2: Verstärkung in Abhängigkeit von der Frequenz

Wie sehr schön zu sehen ist, zeigt die Verstärkung tatsächlich einen starken Abfall bei hohen Frequenzen. Lediglich der erste Messpunkt weicht stark vom erwarteten Ergebnis ab. Wir vermuten einen Messfehler, da ohne diesen Messpunkt auch die Linearität der Verstärkung bei niedrigeren Frequenzen gut zu erkennen wäre.

3 Invertierende Grundschaltung eines Operationsverstärkers

3.1 Invertierende Grundschaltung eines OPV mit $v_U \approx 10$

Hier haben wir zunächst wieder den gewünschten invertierenden OPV auf unserem Schaltboard aufgebaut. Um die Größenordnung seiner Verstärkung zu bestimmen, legten wir eine Sinusspannung an seinen Eingang mit $U_E = 0,5V_{SS}$ und $f = 1\text{kHz}$. Das Ausgangssignal gab uns das Oszilloskop invertiert aus und wir bestimmten seine Amplitude zu $U_A = 4,8V_{SS}$. Daraus ergibt sich eine Verstärkung von $v_U = -9,6$. Die Verstärkung stimmt somit mit der erwarteten von $v_U = -\frac{R_2}{R_1} = -10$ nahezu überein.

3.2 Addierer

Nachdem wir die Schaltung des invertierenden OPV entsprechend erweitert hatten (siehe Vorbereitung), überprüften wir die Funktion des Addierers. Wir bedienten uns dazu einer Spannung von $U = 400\text{mV}_{SS}$. Diese legten wir an den ersten Eingang und zunächst auch an den zweiten, wodurch sich das Ausgangssignal auf dem Oszilloskop gut sichtbar verdoppelte. Um noch eine weitere Addition beobachten zu können, schalteten wir an den zweiten Eingang einen Widerstand von $20\text{k}\Omega$, sodass wir eine Spannung von $U_{E_2} = \frac{1}{2}U_{E_1} = 200\text{mV}_{SS}$ erhielten. Auch hier lieferte uns das Oszilloskop das erwartete Ergebnis, die $\frac{3}{2}$ -fache invertierte Eingangsspannung U_{E_1} .

3.3 Integrierer

Auch hier modifizierten wir den invertierenden OPV und bauten einen Integrierer auf.

Legten wir an den Eingang eine Dreiecksspannung an, so erhielten wir eine invertierte Sinuskurve.

Bei Anlegen einer Rechteckspannung zeigte und der Oszilloskop eine invertierte Dreiecksspannung am Ausgang an.

Lag am Eingang eine Sinusspannung an, so erhielten wir am Ausgang eine invertierte Cosinuskurve.

Die Versuchsergebnisse entsprachen demnach unseren Erwartungen.

3.4 Differenzierer

Auch hier ändern wir wieder den Aufbau den invertierenden OPV gemäß der Schaltskizze des Differenzierers aus der Vorbereitung.

Legten wir nun ein Rechtecksignal an den Eingang an, so gab uns der Ausgang ein Signal aus, welches einzelne Peaks aufwies. Dies entspricht gerade der Ableitung einer Rechteckspannung, wobei die Peaks aus den Unstetigkeitsstellen resultieren.

Bei einem Dreiecksignal gab uns der Differenzierer ein Rechtecksignal aus, welches jedoch leicht verzerrt war.

4 Komplexe Schaltungen

4.1 Einweggleichrichter

In diesem Versuch haben wir zunächst den einfachen Einweggleichrichter aufgebaut. Bei Anlegen einer Sinusspannung konnten wir am Oszilloskop beobachten, wie die Spannung invertiert und um die Diodenknickspannung vermindert als Halbwelle ausgegeben wurde. Wir maßen die Diodenknickspannung am Oszilloskop zu $U_D = 0,4\text{V}$.

Nach diesem Vorversuchsteil bauten wir den idealen Einweggleichrichter auf dem Schaltboard auf. Bei Anlegen eines Sinussignals an den Eingang konnten wir am Oszilloskop sehen, dass am Ausgang U_A zwar das komplette Signal wieder ausgegeben wurde, jedoch um die doppelte Diodenknickspannung verzerrt war. Betrachteten wir die Signale an U_{A_1} und U_{A_2} , so erhielten wir nur das gleichgerichtete Eingangssignal, ohne die Erhöhung um U_D .

4.2 Generator für Dreiecks- und Rechtecksignale

Beim Aufbau des Spannungsgenerators benötigten wir lediglich die vom Schaltboard gelieferte Gleichspannung von $\pm 15\text{V}$. Am Oszilloskop beobachteten wir wieder die ausgegebene Spannung und erhielten zunächst eine Rechteckspannung von $U_R = 29V_{SS}$, also einen etwas geringeren Wert als den erwarteten von $U_R^{Erw} = 30V_{SS}$. Dies mag an Verlusten innerhalb der Schaltung, Ungenauigkeit der gelieferten Gleichspannung und am nicht idealen OPV gelegen haben.

Die Dreieckspannung gab uns der Generator mit den erwarteten $U_R = 15V_{SS}$ aus.

Beide Spannungen zeigten kaum Verzerrungen.

4.3 Programmierte Differentialgleichung 2. Ordnung

Auch für diese Schaltung benötigten wir lediglich die vom Schaltboard gelieferte Gleichspannung. Mithilfe des Potentiometers ließ sich sehr gut die Dämpfung regeln und wir konnten am Oszilloskop eine schöne sinusförmige Schwingung beobachten. Je nach Dämpfung nahm die Amplitude der Schwingung zeitlich leicht verzögert zu oder ab.

Es war uns leider nicht möglich, die beiden Grenzfälle zu beobachten. Dies lag an der doch recht groben Einstellung des Potentiometers, womöglich auch an Bedienungsfehlern.