

Versuche P2-59,60,61

Operationsverstärker Versuchsvorbereitung

Thomas Keck und Marco A. Harrendorf, Gruppe: Mo-3
Karlsruhe Institut für Technologie, Bachelor Physik

Versuchstag: 23.05.2011

1 Einleitung

In diesem Praktikumsversuch werden elektrische Verstärkerschaltungen untersucht. Zuerst anhand eines Transistors. Die Grundlage hierfür wurden bereits im Praktikumsversuch zu den Transistorgrundschaltungen erarbeitet. Diese werden hier nur noch knapp wiedergegeben, da der Fokus auf dem Operationsverstärker liegt.

2 Aufgabe 1: Emitterschaltung

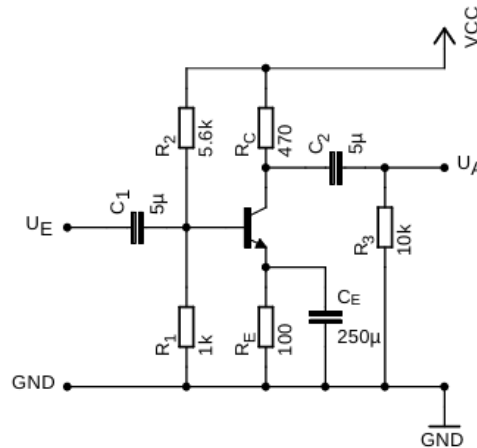


Abbildung 1: Emitterschaltung

Die Emitterschaltung ist eine einfache Transistorverstärkerschaltung. Dabei liegt am Emitter des Transistors ein festes elektrisches Potential (die Erde *GND*) an, daher der Name. Das Eingangssignal U_E wird an die Basis des Transistors angeschlossen. Das Ausgangssignal U_A wird am Kollektor des Transistors abgegriffen.

Am Ein- und Ausgang können jeweils Kondensatoren C_1, C_2 angebracht werden um das innere Potential welches den Arbeitspunkt des Transistors definiert nach außen abzuschirmen.

Über die Widerstände R_1 und R_2 kann die Basis des Emitters auf ein konstantes Potential angehoben werden. Dies ist nötig, da ein Transistor nur positive (npn) oder negative Spannungen (pnp) am Eingangssignal verstärken kann. Über ein zusätzliches konstantes Potential U_B , welches den Arbeitspunkt des Transistors definiert kann dies gewährleistet werden. Der Arbeitspunkt muss so gewählt werden, dass die angelegten Wechselspannungen komplett im positiven Arbeitsbereich des Transistors liegen.

2.1 Aufgabe 1.1: Gleichstromgegekoppelter Transistorverstärker

Da der Verstärkungsfaktor des Transistors stark Baureihen und Temperaturabhängig ist führt man eine **Stromgegenkopplung** durch: Über dem Widerstand R_E fällt bei einem höheren Po-

tential am Eingang eine größere Spannung ab, dies senkt die Spannungsdifferenz zwischen Basis und Emitter und wirkt dem Ausgangsstrom so entgegen. Die Stromgegenkopplung reduziert zwar die Verstärkung, macht diese jedoch stabiler und unabhängig vom Verstärkungsfaktor des Transistors. Es gilt für die Spannungsverstärkung:

$$v_U = -\frac{R_C}{R_E} \quad (1)$$

Bei der **Gleichstromgegenkopplung** wird der Emitterwiderstand R_E mit einem Kondensator überbrückt, sodass nur die Gleichstromanteile bzw. niederfrequenten Anteile des Eingangssignals eine Stromgegenkopplung erfahren. Für hochfrequente Anteile bleibt die Verstärkung wie bei einer reinen Emitterschaltung ohne Stromgegenkopplung. β ist der Stromverstärkungsfaktor des Transistors:

$$v_U = -\beta \cdot \frac{R_C}{r_B} \quad (2)$$

2.2 Aufgabe 1.2: Verstärkung einer Dreiecksspannung

Verschiedene Ausgangsamplituden werden durch die Emitterschaltung erzeugt. Der Verstärkungsfaktor v_U wird bestimmt werden. Anschließend ist es möglich eine Aussage über die Qualität des Verstärkers zu treffen. Die Verstärkung sollte im Idealfall bei unterschiedlichen Eingangsspannungen konstant bleiben.

$$v_U = \frac{U_A}{U_E} \quad (3)$$

2.3 Aufgabe 1.3: Stromgegeggekoppelter Transistorverstärker

Beim stromgegeggekoppelten Transistor wird der Kollektorstrom durch den Widerstand R_C am Kollektor bestimmt, aber auch durch den Emitterwiderstand R_E , da ein größerer Widerstand, einen großen Spannungsabfall zwischen Basis und Emitter hervorruft, welcher den Kollektorstrom reduziert. Für kleine Spannungen kann der Transistor durch einen sehr kleinen Basiswiderstand r_B und einen sehr großen Kollektorwiderstand r_C ersetzt werden. Die Verstärkung lässt sich nun leicht berechnen (Kleinsignalverhalten). Man erhält die Ein und Ausgangsimpedanz der Schaltung. Der kleine Basiswiderstand wurde hier in der Serienschaltung, der große Kollektorwiderstand in der Parallelschaltung jeweils vernachlässigt und tauchen garnicht mehr auf.:

$$Z_E = R_E \cdot (\beta + 1) \quad (4)$$

$$Z_A = R_C \quad (5)$$

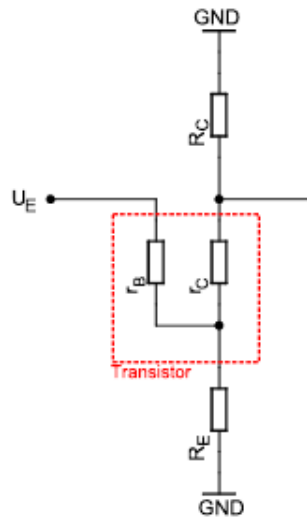


Abbildung 2: Transistorersatzschaltung für das Kleinsignalverhalten

Hieraus lässt sich die Spannungsverstärkung gewinnen:

$$\frac{U_a}{U_E} = \frac{Z_A \cdot I_A}{Z_E \cdot I_E} \quad (6)$$

$$= \frac{Z_A \cdot I_E \cdot \beta}{Z_E \cdot I_E} \quad (7)$$

$$= \frac{R_C \cdot \beta}{R_E \cdot (\beta + 1)} \quad (8)$$

$$\approx \frac{R_C}{R_E} \quad (9)$$

2.4 Aufgabe 1.4: Verstärkung bei verschiedenen Frequenzen

Für verschiedene Frequenzen wird in diesem Teilversuch die Verstärkung bestimmt. Dabei wird erwartet, dass die Verstärkung am stromgegengekoppelten Verstärker unabhängig, am gleichstromgegengekoppelten linear abhängig von der Frequenz ist. Eine Ausnahme bilden sehr niedrige Frequenzen, welche eine starke Dämpfung an den Kopplungskondensatoren am Ein und Ausgang besitzen, diese werden entsprechend weniger verstärkt. Und sehr hohe Frequenzen, für die jeweils eine reine Emitterschaltung vorliegt, die stark vom Verstärkungsfaktor β des Transistors abhängt.

3 Aufgabe 2: Grundschialtung des Operationsverstärkers

Das Funktionsprinzip des Operationsverstärkers ist in der [Vorbereitungshilfe] wiedergegeben. Es ist hier nochmals zusammengefasst

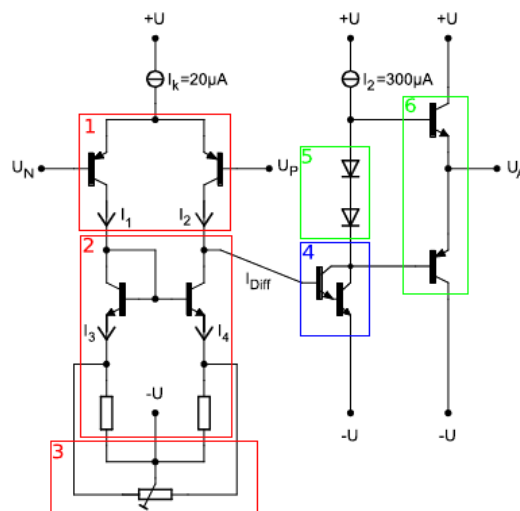


Abbildung 3: Schematischer Aufbau eines Operationsverstärkers

Der Operationsverstärker besitzt 2 Eingänge, diese werden auf jeweils auf die Basis eines Transistors gelegt, es entstehen 2 Kollektorströme die antiproportional zur zu den angelegten Signalen sind. Man nennt diesen Schaltungsteil „Differenzverstärker“ (1).

Im nachfolgenden „Stromspiegel“ (2) wird die Differenz der beiden Ströme herausgefiltert und zur Verstärkerstufe (4) geleitet. Hier wird der Strom über 2 hintereinandergeschaltete Transistoren verstärkt und zur Endstufe (6) weitergeleitet. Diese Differenzbildung hat zur Folge, dass ein Eingang als invertierend der andere als nichtinvertierend ausgezeichnet ist, wenn man den jeweils anderen auf Masse legt.

Im letzten Schritt wird der Strom in einem komplementären Emitterfolger nochmals verstärkt. Diese Schaltung bietet die Vorteile einer hohen Eingangsimpedanz und einer niedrigen Ausgangsimpedanz, bei einem hohen Wirkungsgrad.

Für eine leichtere Berechnung von Ein und Ausgangsspannungen kann man den Operationsverstärker als idealen OPV idealisieren. Dies geschieht über die 3 goldenen Regeln:

1. Die Verstärkung des OPV ist unendlich $v \rightarrow \infty$
2. Der Eingangswiderstand ist unendlich $R_E \rightarrow \infty$
3. Der Ausgangswiderstand ist Null $R_A \rightarrow 0$

Wegen der großen Verstärkung kann ein OPV als Verstärker nur gegengekoppelt verwendet werden, sodass die Verstärkung begrenzt ist. die Kopplung wird dabei jeweils auf den invertierenden Eingang gelegt um der Verstärkung entgegenzuwirken.

3.1 Aufgabe 2.1: Nichtinvertierender Verstärker

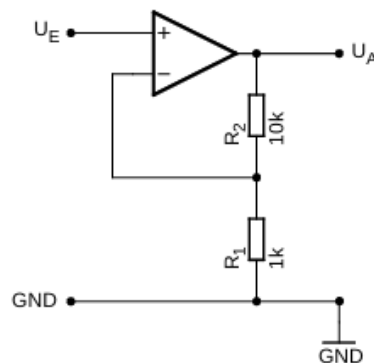


Abbildung 4: Schaltskizze zum Nichtinvertierenden Verstärker

Mit Hilfe einer Dreiecksspannung als Eingangssignal wird wiederum die Verstärkung gemessen. Eine zehnfache Verstärkung soll erreicht werden. Das Eingangssignal liegt hier, wie die Überschrift bereits verrät, am nichtinvertierenden Eingang des OPV an. Der OPV ist auf dem invertierenden Eingang gegengekoppelt über den Widerstand R_2 . Da nach der 1. goldenen Regel die Verstärkung unendlich ist müssen beide Eingänge auf dem gleichen Potential liegen, damit man überhaupt etwas messen kann. Ausgehend hiervon kann über den Spannungsteiler $R_1 - R_2$ die Verstärkung berechnet werden:

$$U_A = U_1 + U_2 \quad \text{Spannungsabfall insgesamt ist die Ausgangsspannung} \quad (10)$$

$$U_E = U_1 \quad \text{In der Mitte des Spannungsteilers muss } U_E \text{ anliegen} \quad (11)$$

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{R_2}{R_1} \quad \text{Der Spannungsteiler} \quad (12)$$

$$U_2 = \frac{R_2}{R_1} \cdot U_E \quad (13)$$

$$U_A = U_E \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (14)$$

$$\frac{U_A}{U_E} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (15)$$

Mit den vorgegebenen Widerständen ergibt sich eine Verstärkung von $v_U = 11$.

3.2 Aufgabe 2.2: Messung der Eingangs- und Ausgangsimpedanz

Eingangsimpedanz Ein bekannter Widerstand R_M wird in Reihe mit dem OPV geschaltet und eine bekannte Spannung U_E angeschlossen. Die über dem bekannten Widerstand abfallende Spannung U_M kann gemessen werden. Für die Eingangsimpedanz ergibt sich dann über die

Spannungsteilergleichung:

$$\frac{U_E}{U_M} = \frac{X + R_M}{R_M} \quad (16)$$

$$X = R_M \cdot \left(\frac{U_E}{U_M} - 1 \right) \quad (17)$$

Ausgangsimpedanz Hierfür wird der OPV parallel zu einem Potentiometer geschaltet. Das Ausgangssignal wird beobachtet, sinkt es auf die Hälfte ab, so entspricht der aktuelle Widerstand am Potentiometer ungefähr der Ausgangsimpedanz. Auch diese Messung funktioniert also nach dem Prinzip eines Spannungsteilers.

3.3 Aufgabe 2.3: Verstärkung bei verschiedenen Frequenzen

Als Eingangssignal wird ein Sinus gewählt, das Ausgangssignal wird beobachtet und die Verstärkung berechnet. Im normalen Betrieb bei niedrigen und mittleren Frequenzen sorgt die Rückkopplung dafür, dass die Verstärkung nahezu konstant bleibt. Ab einer gewissen Grenzfrequenz f wird die Verstärkung kleiner als durch die Gegenkopplung vorgegeben, für noch größere Frequenzen bricht die Verstärkung deshalb ein.

4 Aufgabe 3: Invertierender Verstärker

4.1 Aufgabe 3.1: Invertierender Verstärker

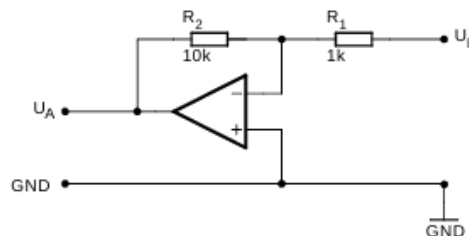


Abbildung 5: Schaltskizze zum invertierenden Verstärker

Das Eingangssignal wird hierbei auf den invertierenden Eingang des OPV gelegt. Wiederum wird das Ausgangssignal über einen Widerstand auf den Eingang zurückgekoppelt um die Verstärkung zu begrenzen. Analog zum nichtinvertierenden Verstärker, liegt auch hier wieder an beiden Eingängen nach den goldenen Regeln die gleiche Spannung an. Die gesamte Eingangsspannung fällt also am Widerstand R_1 ab. Die Eingänge des OPV haben einen unendlich hohen

Widerstand, sodass der Strom I_E über R_2 abfließt, hierbei fällt die Spannung $-U_A$ ab.

$$U_E = R_1 \cdot I_E \quad (18)$$

$$U_A = -R_2 \cdot I_E \quad (19)$$

$$\frac{U_A}{U_E} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (20)$$

Mit den in der Vorbereitung gegebenen Widerständen ergibt sich also wiederum ein Verstärkungsfaktor von $v_U = 11$

4.2 Aufgabe 3.2: Addierer für 2 Eingangssignale

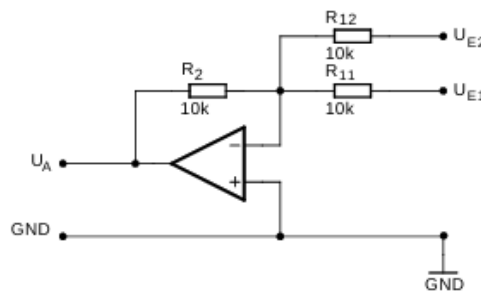


Abbildung 6: Schaltskizze zum Addierer

Völlig analog zur vorherigen Schaltung, liegen auch hier beide Eingänge auf dem gleichen Potential (Erde), die Spannungen U_{E1} und U_{E2} fallen also komplett über ihren Widerständen ab. Die Spannung $-U_2$ fällt über R_2 ab wenn der Strom $I_1 + I_2$ der Eingänge zum Ausgang fließen. Für die Ausgangsspannung folgt:

$$U_{E1} = R_{11} \cdot I_1 \quad (21)$$

$$U_{E2} = R_{12} \cdot I_2 \quad (22)$$

$$U_A = R_2 \cdot (I_1 + I_2) \quad (23)$$

$$U_A = R_2 \cdot \left(\frac{U_{E1}}{R_{11}} + \frac{U_{E2}}{R_{12}} \right) \quad (24)$$

Sind alle Widerstände der Schaltung gleich groß, so addiert der OPV gerade die beiden Eingänge zur Ausgangsspannung. Diese Addiererschaltung wird mit verschiedenen Eingangssignalen im Praktikum erprobt werden: Rechteck, Dreieck, Sinus und Gleichspannung.

4.3 Aufgabe 3.3: Integrierer

Auch diese Schaltung ist analog zum invertierenden Verstärker aufgebaut. Die Rückkopplung des Ausgangssignals auf den invertierten Eingang erfolgt diesmal über einen Kondensator. Wieder gilt, dass die Eingänge auf dem gleichen Potential liegen müssen. Das Ausgangssignal $-U_A$

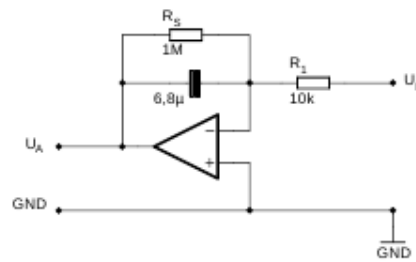


Abbildung 7: Schaltskizze zum Integrierer

fällt dieses mal jedoch über dem Kondensator C ab!

$$U_E(t) = R_1 \cdot I(t) \quad (25)$$

$$U_A(t) = -\frac{Q(t)}{C} \quad (26)$$

$$= -\frac{1}{C} \cdot \int_0^t I(t) dt \quad (27)$$

$$= -\frac{1}{R_1 \cdot C} \cdot \int_0^t U_E(t) dt \quad (28)$$

Die Ausgangsspannung ist also proportional zum Integral der Eingangsspannung. Der zusätzlich parallel geschaltete Widerstand R_S dient lediglich dazu asymmetrien im Eingangssignal abzubauen, da der Kondensator sich sonst immer weiter aufladen würde.

Im Praktikum wird diese Schaltung mit verschiedenen Spannungen untersucht werden.

4.4 Aufgabe 3.4: Differenzierer

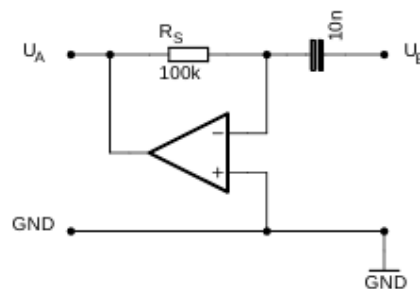


Abbildung 8: Schaltskizze zum Differenzierer

Ein letztes Mal gilt, dass das Potential an den Eingängen gleich ist. Über dem Kondensator

fällt also das gesamte Eingangssignal ab, und über dem Widerstand R_S das negative Ausgangssignal.

$$U_A(t) = -R_S \cdot I(t) \quad (29)$$

$$U_E(t) = \frac{Q(t)}{C} \quad (30)$$

$$= \frac{1}{C} \cdot \int_0^t I(t) dt \quad (31)$$

$$I(t) = C \cdot \dot{U}_E(t) \quad (32)$$

$$U_A(t) = -R_S \cdot C \cdot \dot{U}_E(t) \quad (33)$$

Die Ausgangsspannung ist also proportional zur Ableitung der Eingangsspannung. Die Schaltung differenziert also wirklich. Auffällig ist die Analogie zum RC-Glied welches ebenfalls direkt als Integrierer und Differenzierer verwendet werden kann, der OPV behebt jedoch das Problem der frequenzabhängigen Amplitude des Ausgangssignals, da die Verstärkung sich automatisch anpasst.

5 Aufgabe 4: Komplexere Schaltungen

6 Aufgabe 4.1: Idealer Einweggleichrichter

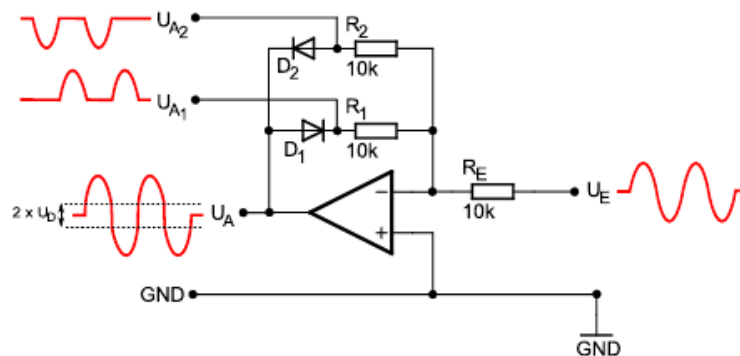


Abbildung 9: Schaltskizze zum idealen Einweggleichrichter

Bei einem normalen Gleichrichter mit einer Diode, besteht das Problem der Diodenknickspannung. Das Eingangssignal wird auch in Durchlassrichtung erst ab einer bestimmten Knickspannung durchgelassen. Dieses Problem lässt sich durch den Einsatz eines OPV beheben.

In der Schaltskizze erkennt man, dass der Ausgang diesmal über 2 Wege mit jeweils einer Diode und einem Widerstand zurückgekoppelt ist. Die Dioden stehen dabei komplementär zu ihren Durchlassrichtungen, sodass immer nur auf einem Weg zurückgekoppelt wird. An diesen Dioden fällt auch weiterhin die Diodenknickspannung ab, und an den Widerständen der Rest.

Der Clou ist nun, dass der OPV die Diodenknickspannung gerade ausgleicht, da die Ausgangsspannung solange steigt wie an den Eingängen eine Differenz herrscht. Die Differenz der Diodenknickspannung sorgt also gerade für die Überhöhung des Signals um die Diodenknickspannung am Ausgang!. Diese Überhöhung fällt wiederum an der Diode ab, und am Widerstand nun die restliche, richtige Halbwelle des Eingangssignals.

An den beiden Widerständen kann nun jeweils die passende Halbwelle ohne Beeinflussung einer Knickspannung abgegriffen werden. Einsatzgebiet sind vor allem in der Messtechnik, in der es auf die Unverfälschte weitergabe der Signale ankommt.

7 Aufgabe 4.2: Generator für Dreieck und Rechtecksignale

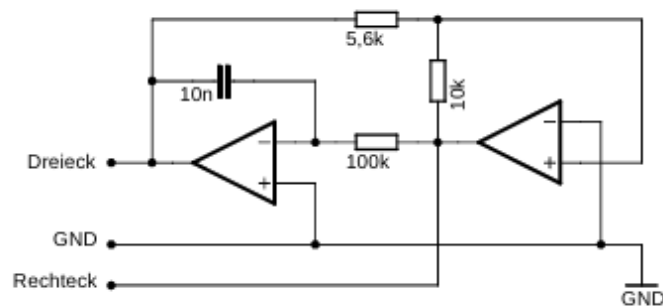


Abbildung 10: Schaltskizze zum Generator für Dreieck und Rechtecksignale

In dieser selbsterregenden Schaltung gibt es überhaupt kein Eingangssignal, die Spannung wird alleine durch die an die OPVs angeschlossene Gleichspannungs-Stromversorgung erzeugt. Der linke OPV arbeitet als Integrator. Sein Eingang ist die in der Mitte abgreifbare Rechteckspannung. Eine Rechteckspannung integriert gibt eine Dreieckspannung. Der linke Teil der Schaltskizze ist damit nachvollzogen. Der rechte OPV ist ein sogenannter Schmitt-Trigger. Nach der goldenen Regel ist die Verstärkung unendlich, der OPV gibt also je nachdem an welchem seiner Eingänge ein höheres Potential anliegt, seine Maximalspannung von $\pm 15V$ aus.

Der Schmitt-Trigger gibt nun z.B. eine Spannung von $-15V$ aus, diese werden durch den Integrator integriert, dessen Ausgang (positiv, da invertiert) ist wiederum auf den nichtinvertierten Eingang des Triggers zurückgekoppelt. Die negative Ausgangsspannung des Triggers ist ebenfalls auf diesen Ausgang zurückgekoppelt. Durch die wachsende positive Dreiecksspannung wird das Potential am nichtinvertierten Eingang schlussendlich größer als am invertierten (der auf Masse liegt), und der Schmitt-Trigger schaltet um auf $+15V$. Nun beginnt der Integrator seine Integration von neuem bis der nichtinvertierte Eingang wieder unter dem Niveau der Masse liegt.

An den entsprechenden Stellen können also eine Dreiecksspannung und eine Rechteckspannung

abgegriffen werden.

8 Aufgabe 4.3: Programmierte Differentialgleichung 2. Ordnung

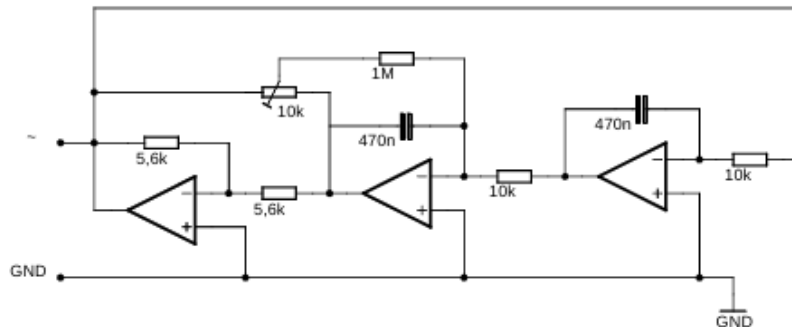


Abbildung 11: Schaltskizze zur programmierten Differentialgleichung 2. Ordnung

Es handelt sich wieder um eine selbsterregende Schaltung. In der Schaltskizze erkennt man 3 OPV. Die beiden rechten sind jeweils Integratoren. Der linke OPV arbeitet als invertierender Verstärker mit einem Verstärkungsfaktor von $v_U = 1$. Er koppelt das Signal $-\omega_0^2 \cdot x$ auf den „Eingang“ der sich ganz rechts befindet zurück. Der vom invertierenden Verstärker rechte Integrator koppelt über ein Potentiometer also die Ableitung $2 \cdot \beta \dot{x}$ auf den Eingang zurück. Am Eingang liegt hinter dem rechtesten Integrator dann natürlich \ddot{x} an. Insgesamt ergibt sich so eine lineare Differentialgleichung 2. Ordnung:

$$\ddot{x} + 2 \cdot \beta \dot{x} = -\omega_0^2 x \quad (34)$$

Über den Potentiometer kann β verändert werden. Für große Dämpfungen (kleiner Widerstand) erhält man den Kriechfall, für kleine Dämpfungen (großer Widerstand) den Schwingfall, und irgendwo dazwischen den aperiodischen Grenzfall. Alle 3 Fälle sollen im Praktikumsversuch erzeugt werden.

Literatur

[Aufgabenstellung] Aufgabenstellung zu den Versuchen P2-59,60,61

[Vorbereitungshilfe] Vorbereitungshilfe zu den Versuchen P2-59,60,61