

Physikalisches Anfängerpraktikum (P2)

P2-61: Operationsverstärker

Vorbereitung

Matthias Ernst
Matthias Faulhaber

Durchführung: 09.12.2009

1 Transistor in Emitterschaltung

1.1 Transistorverstärker (gleichstromgegekoppelt)

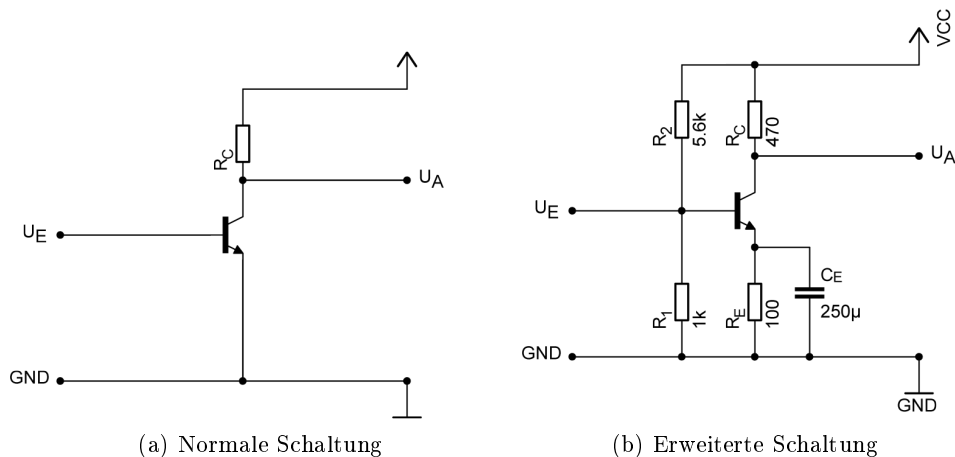


Abbildung 1: Emitterschaltung eines Transistors

In diesem Versuch wollen wir einen Transistor in Emitterschaltung betrachten. Die Emitterschaltung liefert die größte mit einer Transistorschaltung mögliche Strom- und Spannungsverstärkung. Da sie jedoch stark von den Eigenschaften des Transistors abhängig ist, bedienen wir uns hier einer erweiterten Schaltung. Mithilfe eines Widerstands R_E am Emitter realisieren wir eine Stromgegenkopplung. Bei einer Erhöhung der Eingangsspannung fließt mehr Strom durch R_E , und es fällt mehr Spannung daran ab. Dadurch wird das Emitterpotential angehoben, sodass wiederum der Stromfluss verringert wird.

Weiterhin schalten wir einen Kondensator C_E parallel zu R_E . Dies ist die sogenannte Gleichstromgegenkopplung, durch die wir eine besonders große Verstärkung für große Frequenzen erhalten. Mithilfe der Widerstände R_1 und R_2 lässt sich das Potential des Emitters anheben, sodass auch Signale unterhalb der Diodenknickspannung verstärkt werden können. Die Kondensatoren C_1 und C_2 unterdrücken einen möglichen Gleichstromoffset.

1.2 Bestimmung der Verstärkung

Hier legen wir eine Dreiecksspannung mit einer Frequenz $f \approx 1\text{kHz}$ an den Eingang. Wir vergleichen Eingangs- und Ausgangssignal auf einem Oszilloskop und bestimmen so die Verstärkung.

1.3 Verstärkung ohne Emitterkondensator C_E (stromgegekoppelt)

Hier entfernen wir nun den Emitterkondensator C_E aus der Schaltung und können dann die Verstärkung berechnen. Dazu dürfen wir uns für kleine Signale einer linearen Ersatzschaltung bedienen, in der der Transistor durch die Widerstände r_C (Kollektorwiderstand, sehr groß) und r_B (Basiswiderstand, sehr klein) ersetzt wird. (*Vorsicht: Transistor i.A. kein lineares Bauteil!*)

Betrachten wir nun die Eingangs- und Ausgangsimpedanzen und beachten dabei, dass in einer Parallelschaltung sehr große, und in einer Reihenschaltung sehr kleine Widerstände vernachlässigbar sind, so erhalten wir (mit dem Verstärkungsfaktor β):

(Schreibweise: "+" für Reihenschaltung, "||" für Parallelschaltung)

$$Z_E = r_B + [\beta \cdot r_C || (\beta + 1) \cdot R_E] \stackrel{R_E \ll r_C}{\approx} r_B + (1 + \beta) \cdot R_E \quad r_B \ll R_E \quad (1 + \beta) \cdot R_E$$

$$Z_A = R_C || \left[r_C + \left(\frac{1}{\beta} \cdot r_B || \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \cdot R_E \right) \right] \stackrel{r_B \ll R_E}{\approx} R_C || \left[r_C + \frac{1}{\beta} \cdot r_B \right] \stackrel{r_B \ll r_C}{\approx} R_C || r_C \stackrel{R_C \ll r_C}{\approx} R_C$$

Damit und mit der Stromverstärkung $v_I = \frac{I_A}{I_E}$ erhalten wir für die Spannungsverstärkung v_U :

$$|v_U| = \left| \frac{U_A}{U_E} \right| = \frac{Z_A \cdot I_A}{Z_E \cdot I_E} = \frac{R_C \cdot \beta \cdot I_E}{R_E \cdot (\beta + 1) \cdot I_E} = \frac{R_C}{R_E} \cdot \frac{\beta}{\beta + 1} \approx \frac{R_C}{R_E}$$

Damit, dass die Emitterschaltung eine invertierende Schaltung ist, und mit den Kenndaten unserer Apparatur erwarten wir eine Spannungsverstärkung von:

$$v_U = -\frac{R_C}{R_E} = -\frac{470\Omega}{100\Omega} = -4,7 \quad (1)$$

1.4 Frequenzabhängigkeit der Verstärkung

In diesem Aufgabenteil wollen wir die Verstärkung der strom- und der gleichstromgegekoppelten Schaltung bei verschiedenen Frequenzen messen.

Aufgrund der vorgeschalteten Kondensatoren C_1 und C_2 an Ein- und Ausgang erwarten wir, dass niedrige Frequenzen nur gering verstärkt werden. Bei hohen Frequenzen erwarten wir beim gleichstromgegekoppelten Aufbau einen starken Anstieg der Verstärkung.

2 Nichtinvertierende Grundschtaltung eines Operationsverstärkers

In den folgenden Versuchen möchten wir mit Operationsverstärkern arbeiten. Um die Funktionsweise eines OPV grob zu erläutern, betrachten wir uns zunächst ein vereinfachtes Schaltbild:

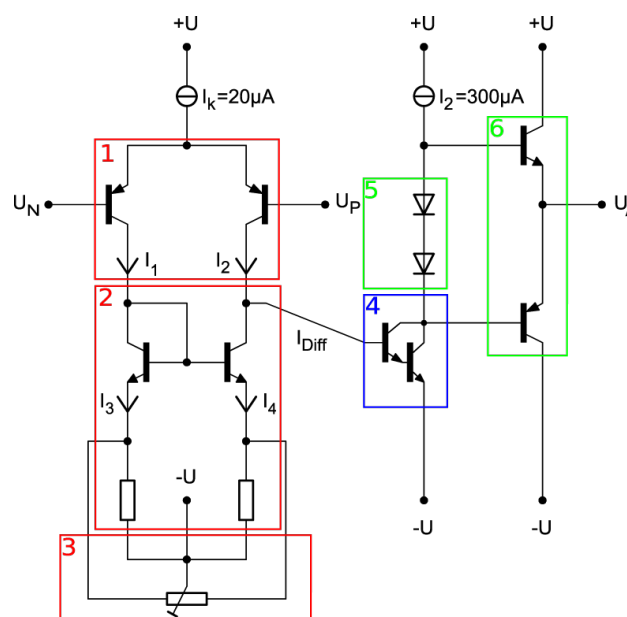


Abbildung 2: Vereinfachter Schaltplan eines Operationsverstärkers

Der OPV lässt sich unterteilen in die drei Teilstufen Eingangsstufe (rot), Verstärkerstufe (blau) und Endstufe (grün).

Die Eingangsstufe setzt sich aus Differenzverstärker (1), Stromspiegel (2) und Nullpunkteinstellung (3) zusammen. Der Differenzverstärker wandelt die Spannungsdifferenz der beiden Eingänge U_N und U_P um in eine Stromdifferenz $I_{D\text{iff}}$. Der Stromspiegel dient dazu, den Anteil der Ströme abfließen zu lassen, der bei beiden gleich groß ist. Dazu sind die beiden Transistoren, sowie die beiden Widerstände in (2) identisch. Dadurch fließt nur die Differenz der Ströme I_1 und I_2 in die nächste Stufe ab. Die Nullpunkteinstellung dient dazu, die Emitterpotentiale der beiden Transistoren in (2) nachzujustieren. Dies kann aufgrund von Fertigungsmängeln nötig sein.

Die Verstärkerstufe besteht aus zwei hintereinander geschalteten Transistoren (Darlingtontransistor), welche das Signal $I_{D\text{iff}}$ verstärken. Da sich die Verstärkungsfaktoren der beiden Transistoren multiplizieren, sind hohe Verstärkungen möglich. Problem dabei ist jedoch, dass die Verstärkung noch von der Ausgangslast abhängig ist. Das heißt, dass bei Anschluss eines geringen Lastwiderstands die Verstärkung stark absinken würde.

Die Endstufe dient als Impedanzwandler des Ausgangssignals der Verstärkerstufe. Sie besteht aus einem Spannungsteiler (5) und einem komplementären Emitterfolger (6). An einem Transistor fällt immer die Knickspannung zweier Dioden ab. Deshalb sind im Spannungsteiler zwei Dioden verbaut, die den Arbeitspunkt des oberen Transistors in (6) auf den des unteren anheben. Im komplementären Emitterfolger sind zwei Transistoren verbaut. Diese sind an komplementäre Versorgungsspannungen angeschlossen (unterschiedliche Vorzeichen), sodass immer nur einer der beiden Transistoren "offen" ist. Der Eingangswiderstand des Emitterfolgers ist sehr hoch, sein Ausgangswiderstand sehr gering - er arbeitet als Impedanzwandler. Durch die komplementäre Bauweise wird ein deutlich höherer Wirkungsgrad im Vergleich zu einer normalen Emitterschaltung erreicht.

Für einen idealen Operationsverstärker gelten die sog. "3 goldenen Regeln":

- Bei einem idealen OPV ist die Verstärkung unendlich. (Daraus folgt: $U_P \approx U_N$, da sonst der Ausgang übersteuert.)
- Der Eingangswiderstand des OPV ist unendlich groß. (D.h. es fließt kein Strom in den OPV.)
- Der Ausgangswiderstand ist gleich Null, d.h. die Ausgangsspannung ist unabhängig von der Last und somit vom Ausgangsstrom I_A (für $I_A < I_{A\text{max}}$)

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

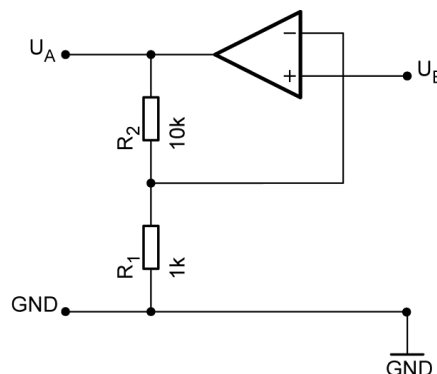


Abbildung 3: Schaltplan der nichtinvertierenden Grundschtaltung des OPV

In diesem Versuch wollen wir einen nichtinvertierenden OPV mit einer Verstärkung von $v_U \approx 10$ auf dem Schaltboard aufbauen und untersuchen.

Um die Verstärkung des OPV auf den gewünschten Wert einzustellen, verwenden wir im Versuchsaufbau eine Rückkopplung des Ausgangssignals auf den invertierenden Eingang des OPV.

Nach der "1. goldenen Regel" ist die Verstärkung eines idealen OPV unendlich groß und die Ausgangsspannung nur dann nicht maximal, wenn an beiden Eingängen etwa gleich große Signale anliegen ($U_1 \approx U_E$). Die Widerstände R_1 und R_2 dienen uns daher als Spannungsteiler, um die gewünschte Spannung am invertierenden Eingang einzustellen. Hierbei gilt:

$$\frac{U_2}{R_2} = \frac{U_1}{R_1} \quad \begin{matrix} U_A = U_1 + U_2 \\ U_1 \xleftrightarrow{=} U_E \end{matrix} \quad \frac{U_A - U_E}{R_2} = \frac{U_E}{R_1} \quad \Leftrightarrow \quad U_A = \underbrace{\left(\frac{R_2}{R_1} + 1\right)}_{v_U} \cdot U_E \quad (2)$$

Wir legen nun eine Dreiecksspannung an den Eingang und erwarten, eine Verstärkung von $v_U = 11$ am Oszilloskop beobachten zu können.

2.2 Eingangs- und Ausgangswiderstand

Hier wollen wir den großen Eingangs- und geringen Ausgangswiderstand des OPV demonstrieren. Dazu messen wir beide auf unterschiedliche Arten.

Um zunächst den Eingangswiderstand R_E zu bestimmen, schalten wir einen Widerstand R_M bekannter Größe in Reihe vor den OPV. R_E können wir nun durch Messung der an R_M abfallenden Spannung U_M bestimmen zu:

$$\frac{U_M}{R_M} = \frac{U_E}{R_E + R_M} \Leftrightarrow R_E = \left(\frac{U_E}{U_M} - 1\right) \cdot R_M \quad (3)$$

Um nun auch noch den Ausgangswiderstand R_A zu bestimmen, schalten wir ein Potentiometer mit Widerstand R_P parallel zu ihm. Der Strom I_A durch R_A bleibt gleich, jedoch sinkt durch den geänderten Gesamtwiderstand $R_G = \left(\frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_P}\right)^{-1}$ die Ausgangsspannung U_A . Regeln wir nun R_P so, dass R_P genau R_A entspricht, so gilt:

$$U_A^{mit} = R_G \cdot I = \frac{1}{2} \cdot R_A \cdot I = \frac{1}{2} \cdot U_A^{ohne} \quad (4)$$

Den Fall $R_P=R_A$ haben wir folglich dann erreicht, wenn die Spannung U_A auf die Hälfte ihres Wertes vor dem Einbau des Potentiometers gesunken ist.

2.3 Frequenzabhängigkeit der Verstärkung

In diesem Teilversuch möchten wir die Verstärkung auf ihre Frequenzabhängigkeit hin untersuchen. Dazu legen wir an den OPV eine sinusförmige Wechselspannung von $0,5V_{SS}$ an. Diese variieren wir und erwarten aufgrund der Rückkopplung, bei hohen Frequenzen einen starken Abfall der Verstärkung beobachten zu können.

3 Invertierende Grundsaltung eines Operationsverstärkers

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

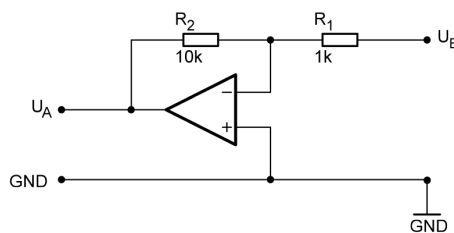


Abbildung 4: Schaltplan der invertierenden Grundsaltung des OPV

In diesem Versuchsteil möchten wir einen invertierenden Verstärker aufbauen und untersuchen. Auch hier gilt wieder die "1. goldene Regel", sodass die beiden Eingangsspannungen einander

entsprechen müssen: $U_+ = U_-$. Da $U_+ = 0V$ gilt auch $U_- = 0V$, die gesamte Spannung U_E fällt also an R_1 ab. Da auch die "2. goldene Regel" gilt, fließt der gesamte Strom durch den Widerstand R_2 . Die an ihm abfallende Spannung ist gleich der Ausgangsspannung und es gilt:

$$U_A = \underbrace{-\frac{R_2}{R_1}}_{\text{Verstärkungsfaktor } v_U = -10} \cdot U_E \quad (5)$$

3.2 Addierer

Hier wollen wir nun zwei Spannungen mithilfe unseres invertierenden OPVs addieren. Wir benutzen dazu die Grundsaltung aus 3.1 und erweitern diese um eine weitere Spannung U_{E2} . Die Spannungen U_{E_i} fallen jeweils an den Widerständen R_{1_i} vollständig ab, sodass am negativen Eingang des OPV wieder eine sog. "virtuelle" Masse anliegt. Da alle Widerstände gleich groß sind und an R_2 die Spannung $U_{R_2} = U_{E_1} + U_{E_2}$ abfällt, erhalten wir:

$$U_A = -(U_{E_1} + U_{E_2})$$

Der Addierer gibt uns das Ergebnis folglich invertiert aus.

Anhand von Gleich-, Sinus- und Rechteckspannungen wollen wir nun die Funktionsweise überprüfen und das Ergebnis an einem Oszilloskop darstellen.

3.3 Integrierer

In diesem Versuchsteil bedienen wir uns wiederum der invertierenden Grundsaltung aus 3.1, ersetzen jedoch R_2 durch einen Kondensator $C = 6,8\mu F$. Für den Strom $I = \frac{U_E}{R_1}$ und die Ladung $Q = \int I dt$ des Kondensators ergibt sich als Ausgangsspannung:

$$U_A = U_C = -\frac{Q}{C} = -\frac{1}{RC} \int U_E dt \quad (6)$$

Auch hier wird uns das Ergebnis wieder invertiert ausgegeben.

Um die Stabilität des Integrierers zu verbessern, schalten wir noch einen Widerstand $R_S = 1M\Omega$ parallel zum Kondensator.

3.4 Differenzierer

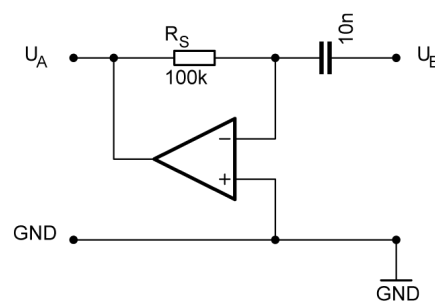


Abbildung 5: Schaltplan des invertierenden Differenzierers

Hier wollen wir nun einen Differenzierer aufbauen und durch Anlegen von Rechteck- und Dreieckspannungen näher untersuchen.

Für den Strom I und die Ausgangsspannung U_A gilt:

$$I = \dot{Q} = \frac{d}{dt} (C \cdot \dot{U}_E) = C \cdot \ddot{U}_E \Leftrightarrow U_A = -R_S \cdot C \cdot \dot{U}_E \quad (7)$$

Auch der Differenzierer gibt uns das Ergebnis invertiert aus.

4 Komplexe Schaltungen

4.1 Einweggleichrichter

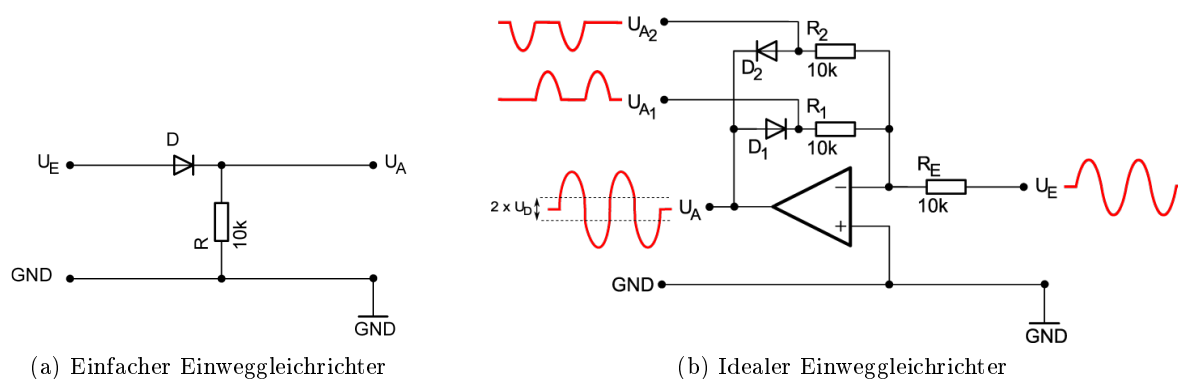


Abbildung 6: Einweggleichrichter

In diesem Versuch wollen wir zwei verschiedene Einweggleichrichter realisieren.

Den ersten, in Abbildung 6a dargestellten, kennzeichnet ein sehr einfacher Aufbau. Sein Nachteil besteht darin, dass an der Diode eine Spannung abfällt, welche im Ausgangssignal nicht mehr enthalten ist.

Der in Abbildung 6b dargestellte Einweggleichrichter behebt dieses Problem, indem an den Widerständen R_1 und R_2 gerade die Eingangsspannung abfällt. Durch die beiden gegensätzlich geschalteten Dioden ist stets nur ein Zweig der Schaltung aktiv. Die Ausgangsspannung ist nun gerade um soviel erhöht, wie Spannung an der jeweils aktiven Diode abfällt. Die Ausgänge U_{A1} und U_{A2} geben folglich gerade den negativen, bzw. positiven Anteil der Eingangsspannung invertiert und ohne Verluste aus.

Die Schaltung baut auf der des invertierenden Operationsverstärkers auf.

4.2 Generator für Dreiecks- und Rechtecksignale

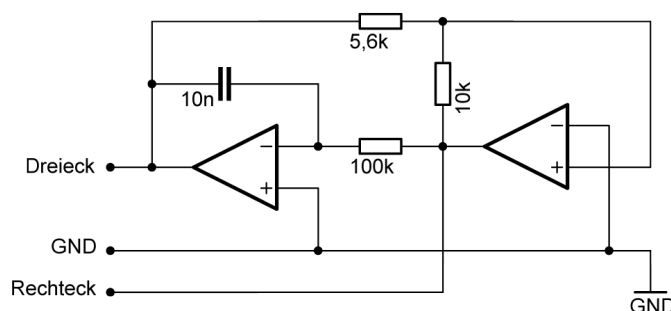


Abbildung 7: Schaltplan des Generators für Dreiecks- und Rechtecksignale

In diesem Versuch betrachten wir eine Schaltung von zwei Operationsverstärkern. Der rechte der beiden, in Abbildung 7 dargestellten, OPVs dient zunächst als sog. Schmitt-Trigger. Seine Funktionsweise wird durch die Rückkopplung über den $5,6\text{k}\Omega$ -Widerstand bestimmt, sodass sein Ausgang (trotz der am Eingang anliegenden Gleichspannung!) ein Rechtecksignal ausgibt. Näheres zur Funktionsweise des Schmitt-Triggers ist der Vorbereitungshilfe von Barth & Benz zu entnehmen.

Der linke OPV ist als Integrierer verschaltet und gibt ein Dreieckssignal aus.

Diese Schaltung baut sowohl auf der eines invertierenden, als auch auf der eines nichtinvertierenden Operationsverstärkers auf.

4.3 Programmierte Differentialgleichung 2. Ordnung

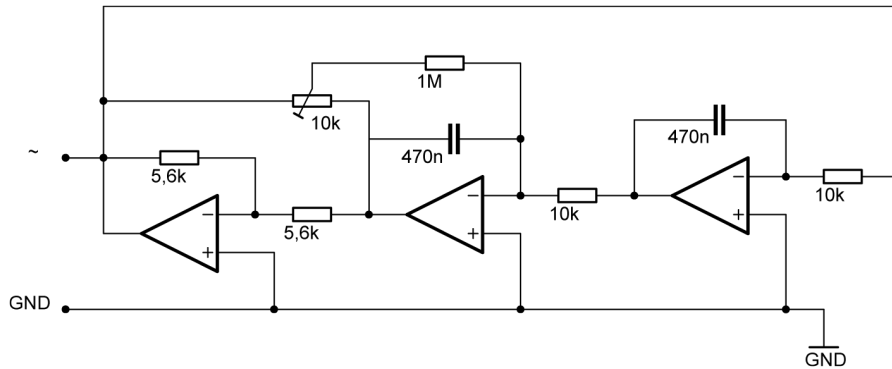


Abbildung 8: Schaltplan der programmierten DGL 2. Ordnung

In diesem Aufgabenteil möchten wir eine Differentialgleichung 2. Ordnung simulieren:

$$\ddot{x} + 2\gamma\dot{x} + \omega_0^2 x = 0$$

Dazu verwenden wir eine Schaltung gemäß Abbildung 8.

Die Faktoren 2β und ω_0^2 werden durch die Wahl der Kondensatoren und Widerstände bestimmt.

Durch das Potentiometer zwischen den beiden integrierenden Operationsverstärkern kann die $\dot{x}(t)$ -Komponente verändert werden, sodass Schwing-, Kriech- und aperiodischer Grenzfall simulierbar sind.

In dieser Schaltung finden zwei Integrationsglieder, die auf dem invertierenden Operationsverstärker aufbauen, sowie ein verstärkendes Glied, welches ebenfalls auf der selben Grundsaltung aufbaut, Verwendung.