

V51: Der Operationsverstärker

Simon Schulte
simon.schulte@udo.edu

Tim Sedlaczek
tim.sedlaczek@udo.edu

Durchführung: Keine ahnung mehr
Abgabe: 13.09.2018

TU Dortmund – Fakultät Physik

1 Theorie

In diesem Versuch werden verschiedene Schaltungen mit Hilfe des Operationsverstärkers realisiert. Zunächst wird auf die physikalischen Eigenschaften eingegangen, woraufhin verschiedene Schaltungen skizziert und schließlich realisiert werden.

1.1 Eigenschaften des Operationsverstärkers

Die wichtigste elektrische Eigenschaft des Operationsverstärkers ist die Proportionalität der Ausgangsspannung U_A zur Differenz der Eingangsspannungen U_p und U_N :

$$U_A = V(U_p - U_N), \quad (1)$$

wobei V die Leerlaufverstärkung bezeichnet. Diese Beziehung gilt in einem Spannungsbereich $-U_B < U_A < U_B$, der durch die Betriebsspannung U_B bestimmt ist. Ausserhalb dieses Bereichs läuft die Ausgangsspannung in eine Sättigung. Die Eingangsspannung U_p wird nicht invertiert, während die Spannung U_N invertiert wird – der Verstärker besitzt also einen nicht-invertierenden und einen invertierenden Eingang. Aus technischer Sicht entspricht der Operationsverstärker einem gleichstromgekoppeltem Differenzverstärker. Er ist in Abbildung 1 dargestellt. Neben der meist frequenzabhängigen Leerlaufverstärkung

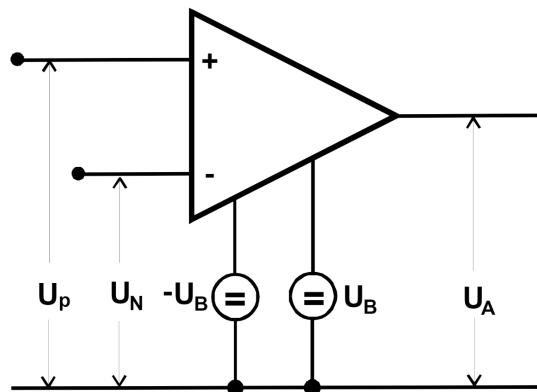


Abbildung 1: Schaltbild eines Operationsverstärkers mit Ausgangsspannung U_A und Eingangsspannungen U_p und U_N [V51].

V besitzt der Operationsverstärker weitere Kenngrößen, wie die Eingangswiderstände, $r_{e,p}$ und $r_{e,N}$, sowie einen Ausgangswiderstand r_a . Um Rechnungen zu Vereinfachen gilt für einen idealen Operationsverstärker

$$V = \infty, \quad r_e = \infty, \quad r_a = 0. \quad (2)$$

Im Gegensatz dazu müssen zur theoretischen Beschreibung eines realen Operationsverstärkers zusätzliche Kenngrößen in Betracht gezogen werden. Die Gleichtaktverstärkung

$$V_{Gl} = \frac{\Delta U_A}{\Delta U_{Gl}} \quad (3)$$

berücksichtigt geringe Asymmetrien der beiden Verstärkungs Kanäle. Dabei bezeichnen ΔU_A die Differenz der Ausgangsspannung zu 0 und ΔU_{Gl} den Unterschied der eigentlich gleichen Eingangsspannungen. Die auf Grund endlicher Eingangswiderstände r_e auftretenden Eingangsströme werden mit I_p und I_N , deren Mittelwert,

$$I_B = \frac{1}{2} (I_p + I_N) , \quad (4)$$

als Eingangsruhestrom und die Differenz

$$I_B = \frac{1}{2} (I_p + I_N) , \quad (5)$$

als Offsetstrom bezeichnet. Ähnlich zum Offsetstrom, verschwindet auch die Spannung häufig nicht. Für die Offsetspannung U_0 gilt daher bei $U_A = 0$

$$U_0 = U_t - U_N . \quad (6)$$

Sie ist abhängig von Temperatur, Zeit und Betriebsspannungen. Die totale Ableitung wird mit Offsetspannungsdrift bezeichnet.

2 Schaltungsbeispiele

Im Folgenden werden einige Schaltbeispiele für Operationsverstärker dargestellt. Das Verhalten des Verstärkers hängt dabei meist nur von der äußeren Schaltung ab und kann damit als annähernd ideal angenommen werden.

2.1 Arten von Operationsverstärkern

2.1.1 Rückgekoppelter Linearverstärker

Der relativ kleine Arbeitsbereich des Operationsverstärkers ist in der Anwendung oft nicht praktikabel. Um diesen Bereich zu verbreitern, wird die Verstärkung reduziert, indem ein Teil der Ausgangsspannung auf den invertierenden Eingang gegeben wird. Der Anteil der zurückgeführten Spannung kann dabei mit Hilfe der Widerstände R_1 und R_N bestimmt werden, die in Abbildung 2 dargestellt sind. Für den Fall $R_N/R_1 \ll V$ lässt sich zeigen, dass die Verstärkung V' nur noch vom Verhältnis dieser beiden Widerstände abhängt. Der Geringe Eingangswiderstand $r_e \approx R_1$ wirkt sich bei hochohmigen Spannungsquellen möglicherweise nachteilig aus. Im nächsten Abschnitt wird daher ein Linearverstärker vorgestellt, der diesen Nachteil umgeht.

2.1.2 Elektrometerverstärker

Wie in Abbildung 3 deutlich wird, wird auch bei diesem Verstärker ein Teil der Ausgangsspannung U_A zum gegengekoppelten Eingang zurückgeführt. Dabei sind die Widerstände R_1 und R_N auf eine andere Art und Weise verschaltet, sodass der Eingangswiderstand in der Größenordnung des Gleichakteingangswiderstandes ($r_{Gl} \approx 10 \text{ G}\Omega$) liegt, hier tritt

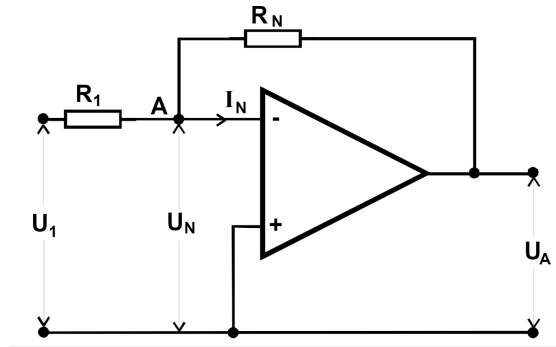


Abbildung 2: Rückgekoppelter Linearverstärker [V51].

das eventuelle Problem des zu geringen Eingangswiderstandes als nicht auf. Störend bei dieser Schaltung kann sich jedoch ein Eingangsruhestrom I_B . Die Verstärkung V' des Elektrometerverstärkers beträgt

$$V' = \frac{U_A}{U_1} = \frac{R_N + R_1}{R_1}.$$

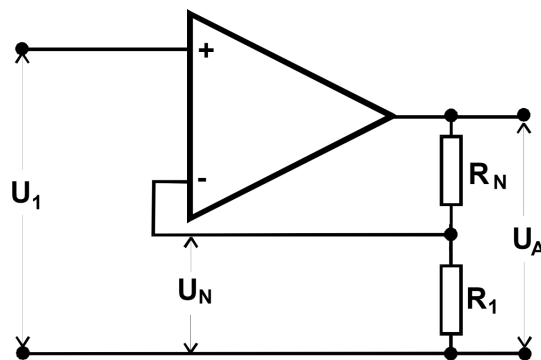


Abbildung 3: Schaltbild eines Elektrometerverstärkers [V51].

2.1.3 OP mit geringem Eingangswiderstand R_e (Ampèremeter)

Im Gegensatz zum grossen Eingangswiderstand R_e eines Elektrometerverstärkers lässt sich, wie in Abbildung 4 dargestellt, ein Linearverstärker mit besonders geringem Eingangswiderstand konstruieren. Somit können zum Beispiel Ströme in einem Ampèremeter gemessen werden, wobei der dazu nötige Spannungsabfall ΔU besonders gering ist.

2.2 Umkehr-Integrator und -Differentiator

Mit Hilfe eines zusätzlichen Kondensators mit Kapazität C in der Schaltung eines Linearverstärkers lässt sich entweder ein Integrations- oder eine Differentiationsglied

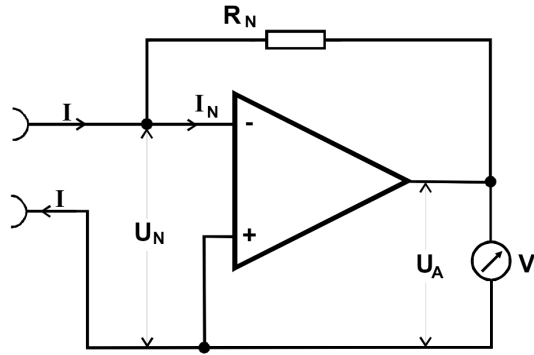


Abbildung 4: Schaltbild eines Elektrometerverstäkers [V51].

bauen. Für die Ausgangsspannungen $U_{A,I}$ des Integrators und $U_{A,D}$ des Differentiators gilt dann

$$U_{A,I} = -\frac{1}{RC} \int U_1(t) dt,$$

und

$$U_{A,D} = -RC \frac{dU_1}{dt},$$

wobei R den Widerstand bezeichnet und Integrator und Differentiator sich nur durch Position des Widerstandes und Kondensators unterscheiden. Die entsprechenden Schaltungen sind in Abbildung 5 dargestellt.

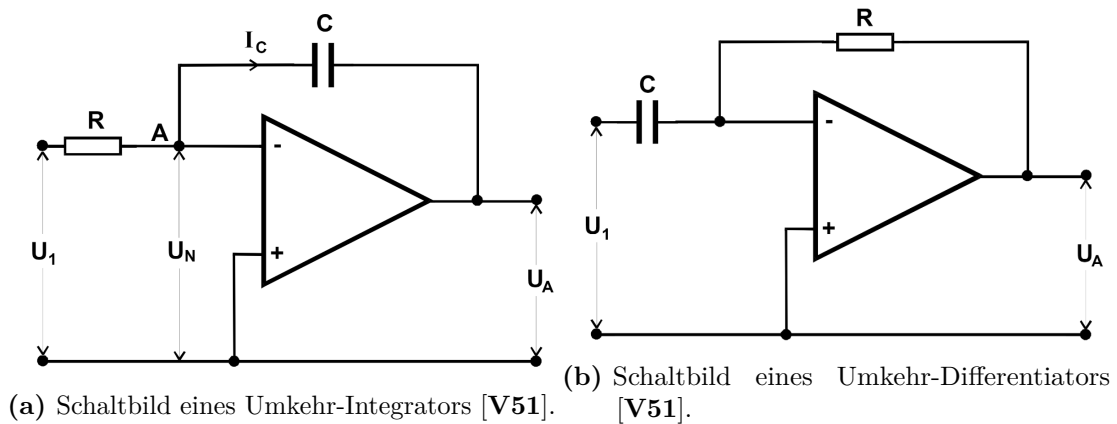


Abbildung 5: Linearverstärker mit Kondensator.

2.3 Logarithmierer und Exponentialgenerator

Neben Differential- und Integral-Operationen können auch Exponentierung und Logarithmierung mit Hilfe des Operationsverstärkers umgesetzt werden. Dabei wird statt eines Kondensators eine Diode eingebaut. Dabei gilt für die entsprechenden Ausgangssignale

$U_{A,E}$ und $U_{A,L}$

$$U_{A,L} = RI \exp \left(\frac{e_0}{k_B T} U_e \right),$$

$$\text{und} \quad U_{A,E} = \frac{k_B T}{e_0} \ln \frac{U_e}{RI},$$

mit der absoluten Temperatur T , der Boltzmannkonstante k_B und der Elementarladung e_0 . Abbildung 6 zeigt die Schaltungen.

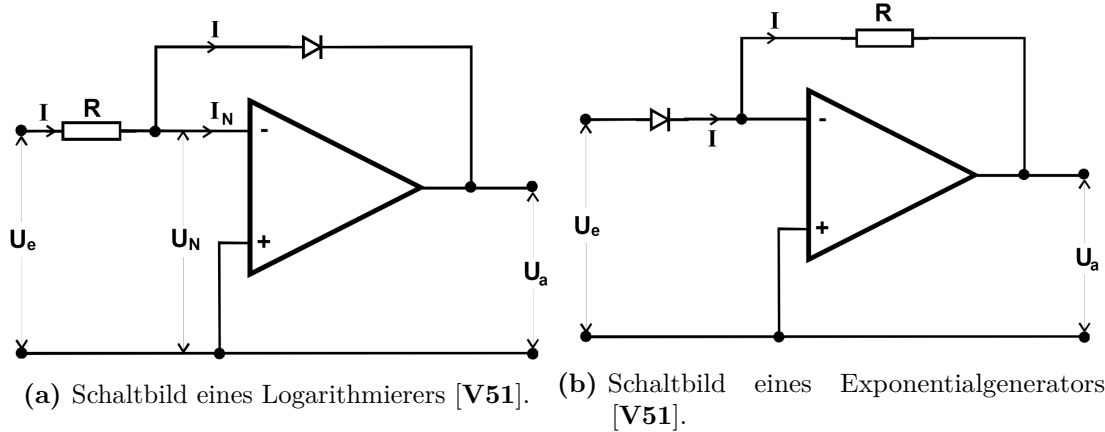


Abbildung 6: Linearverstärker mit Kondensator.

2.4 Schmitt-Trigger

Der Operationsverstärker kann als Schalter genutzt werden. Statt, wie bisher einen Teil der Ausgangsspannung auf einen gegengekoppelten Eingang zu geben, wird dieser Anteil auf einen mitgekoppelten (invertierenden) Eingang gegeben. Damit wird das eigene Ausgangssignal verstärkt, bis der Operationsverstärker in eine Sättigung läuft. Dabei beträgt das Ausgangssignal U_A gerade

$$U_A = \begin{cases} +U_B & : U_1 > \frac{R_1}{R_P} U_B \\ -U_B & : U_1 < -\frac{R_1}{R_P} U_B, \end{cases}$$

mit der Betriebsspannung U_B . Die entsprechende Schaltung ist in Abbildung 7 dargestellt.

2.5 Signalgenerator

Schließlich können mit Hilfe eines Operationsverstärkers verschiedene Signalspannungen erzeugt werden. Dazu wird jeweils eine Mehrzahl von OPs miteinander verschaltet.

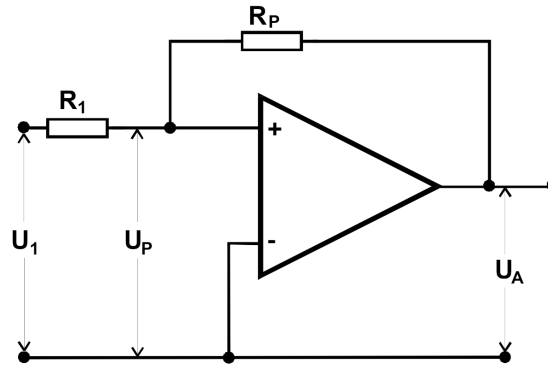


Abbildung 7: Schaltbild eines Operationsverstärkers, der als Schmitt-Trigger genutzt wird.

2.5.1 Erzeugung von Dreieck- und Rechteckspannungen

Durch Kombination eines Schmitt-Triggers mit einem Integrationsglied lassen sich Dreiecks- und Rechtecksspannungen erzeugen. Damit wird die Integration genutzt, um den Schmitt-Trigger zu schalten und somit das Vorzeichen des Signals zu ändern. Je nach Ausgang der in Abbildung 8 dargestellten Schaltung erhält man die gewünschte Spannungsform.

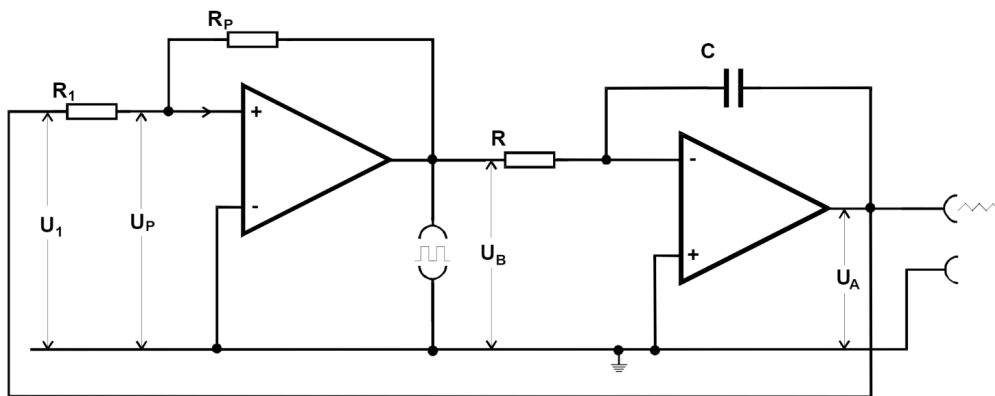


Abbildung 8: Schaltbild zur Erzeugung von Dreieck- und Rechteckspannungen: Es wird ein OP als Integrationsglied mit einem Schmitt-Trigger verschaltet [V51].

2.5.2 Erzeugung von Sinusschwingungen

Durch Kombination zweier Integratoren mit einem Umkehrverstärker lassen sich gedämpfte Sinusschwingungen erzeugen. Die Schaltung kann durch eine Differentialgleichung 2. Ordnung beschrieben werden und liefert die Lösung

$$U_A(t) = U_0 \exp\left(\frac{\eta t}{20RC}\right) \sin\left(\frac{t}{RC}\right).$$

Dabei ist $-1 < \eta < 1$ durch das Potentiometer P einzustellen. Die Schwingungsdauer beträgt dabei $T = 2\pi RC$, die Abklingzeit $\tau = 20RC/|\eta|$. Damit sollte die Amplitude für $\eta = 0$ konstant bleiben. Das Schaltbild zu einem Sinusgenerator ist in Abbildung 9 dargestellt

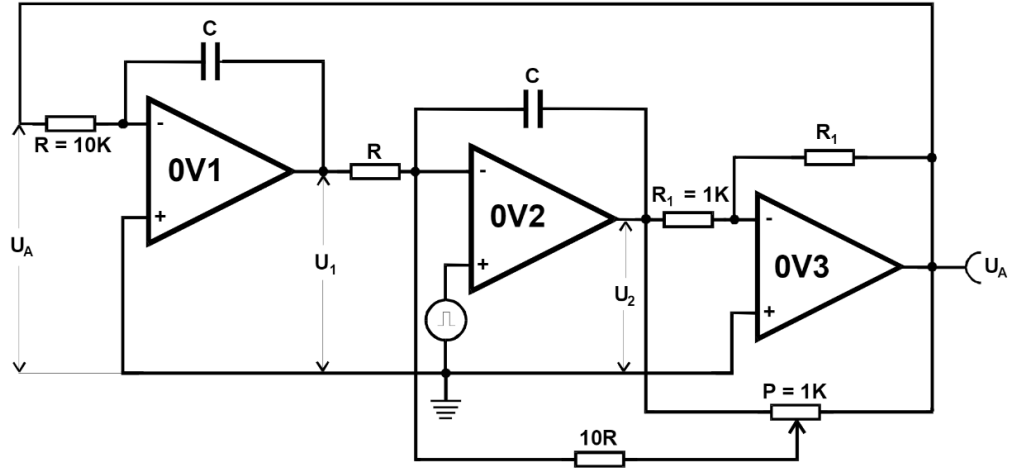


Abbildung 9: Schaltbild eines Sinusgenerators. Es werden zwei Integrationsglieder und ein Umkehrverstärker verbaut [V51].

3 Durchführung

Mit Hilfe der Schaltung 2 wird zunächst der Frequenzgang eines gegengekoppelten Verstärkers bei vier verschiedenen Verstärkungsgraden V' untersucht.

Als nächstes soll ein Umkehr-Integrator zur Überprüfung der Beziehung $U_a \approx \frac{1}{\nu}$ aufgebaut werden.

Daraufhin wird ein Umkehr-Differentiator nach Schaltung 5b verwendet und wie beim Umkehr-Integrator verfahren.

Danach soll ein Schmitt-Trigger wie in in Abbildung 7 verwendet aufgebaut werden. Gemessen wurde dabei ein Umspringen im Spannungsverlauf.

Als Letztes werden gedämpfte Schwingungen untersucht. Zur Realisierung einer gedämpften Schwingung wird die Schaltung nach Abbildung 9 verwendet.