

## Versuch 4

**Operationsverstärker****1. Einleitung**

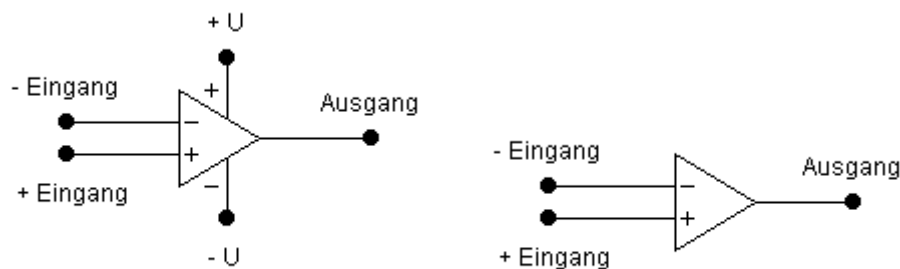
In diesem Versuch sollen Sie einige Anwendungen von Operationsverstärkern (OPV) untersuchen. Gleichzeitig sollen Sie erlernen, im Schaltungseinsatz ihre typischen Eigenschaften und ihre Leistungsfähigkeit zu charakterisieren.

Bei allen Versuchsaufgaben entwerfen Sie wieder zunächst Ihre Schaltung theoretisch. Unter Anwendung von EWB analysieren und dimensionieren Sie dann alle verwendeten Bauelemente - noch bevor Sie die Schaltung tatsächlich aufbauen. Vergleichen Sie bei allen Operationsverstärker- Schaltungen Ihre Messresultate mit den Simulationsergebnissen aus EWB! Erklären Sie die Gründe für auftretende Abweichungen!

Ein OPV ist ein integrierter hochverstärkender Differenzverstärker, der als aktiver Baustein zum Aufbau einer großen Vielfalt von nichtlinearen und linearen Schaltungen verwendet werden kann. Intern besteht ein OPV aus mehreren gleichspannungsgekoppelten Verstärkerstufen. Gewöhnlich besteht die Eingangsstufe aus einem Differenzverstärker mit Bipolar-Transistoren oder FET; am Ausgang arbeitet ein Gegentaktverstärker aus Bipolar-Transistoren.

Ein idealer OPV besitzt (idealisiert!) folgende Eigenschaften:

1. unendlich hoher Eingangswiderstand,
2. unendliche Differentialverstärkung,
3. verschwindende Gleichtaktverstärkung und
4. verschwindender Ausgangswiderstand.



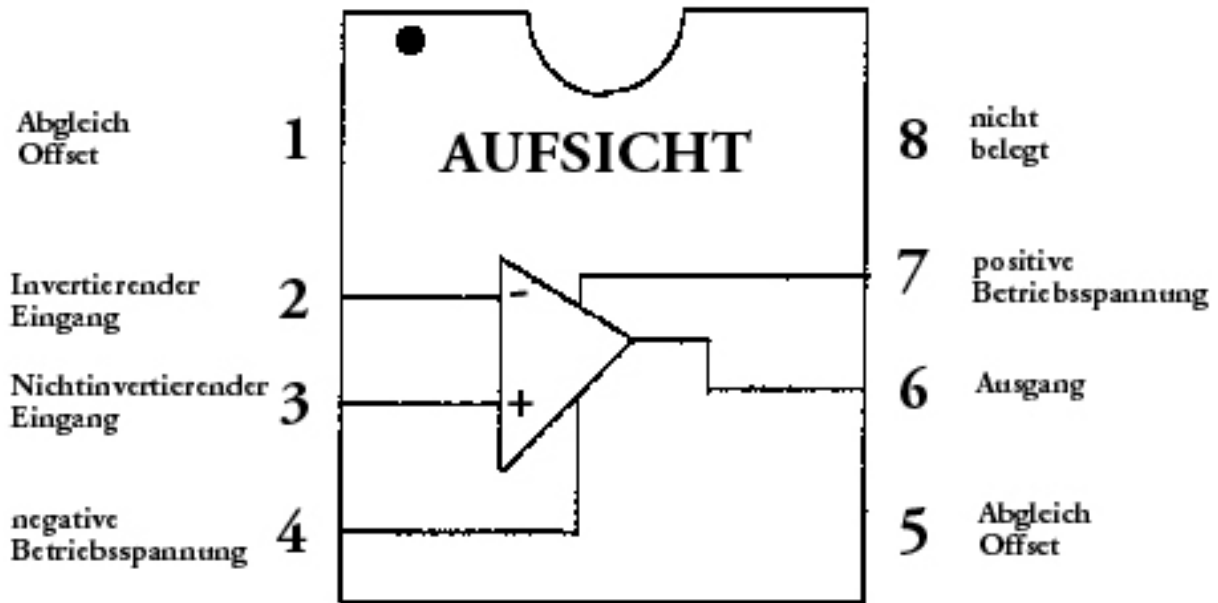
**Abb.1 Schaltungssymbol eines Operationsverstärkers mit 5 Anschlüssen (a) und mit 3 Anschlüssen (b)**

In Abb.1 sehen Sie die standardisierten Schaltungssymbole mit 5 bzw. 3 Anschlüssen. Beachten Sie bitte, dass häufig die zweite Variante verwendet wird – die Betriebsspannungen sind dann dennoch in der praktischen Schaltung zuzuführen, obwohl sie nicht (explizit) eingezeichnet sind!

Zum Verständnis der Arbeitsweise der meisten OPV-Schaltungen ist das Modell des idealen OPV geeignet. Reale OPV weichen aber signifikant von dieser Idealisierung mit den o.g. idealen Eigenschaften ab. Sie haben u.a. einen merklichen Strom- und Spannungs- Offset sowie eine begrenzte Frequenzbandbreite.

In analogen Schaltungen werden OPV allerdings stets mit einer Rückkopplung versehen, so dass das gesamte Schaltungsverhalten primär von der äußeren Beschaltung und weniger von den realen Parametern des OPV abhängt.

Es existieren viele Typen von OPV, die für ein sehr breites Anwendungsspektrum konzipiert sind (siehe u.a. Horowitz and Hill (2nd ed.), Tabelle 4.1 auf S.196 mit einer Auswahl, sowie Sedra and Smith, Abschnitt 10.1-6 für eine detaillierte Beschreibung des OPV  $\mu\text{A} 741$ ). In diesem Versuch wird mit dem "Standard"-Bipolar-OPV  $\mu\text{A} 741$  (Äquivalenztyp z.B. LM741) gearbeitet: Dieser OPV ist (vergleichsweise) einfach einzusetzen, sehr preiswert und universell. Im Versuch werden Sie allerdings auch seine Grenzen kennen lernen und feststellen, dass für einen spezifischen Anwendungsfall auch immer ein geeigneter Typ von OPV eingesetzt werden sollte. Die Pinbelegung des OPV 741 im DIL-Gehäuse zeigt Abb.2:

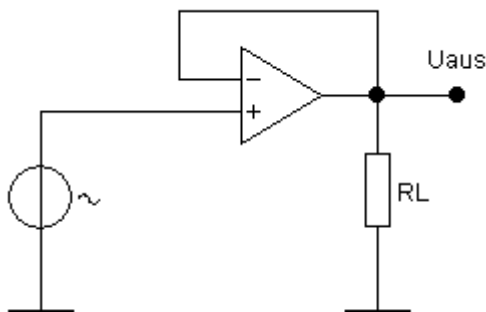


**Abb.2** Schematische Darstellung der Pinbelegung (DIL-Gehäuse) der OPV-IS vom Typ 741

Nachfolgend sollen Sie sich mit den Grundsaltungen für den Einsatz von OPV befassen: Sowohl für nichtinvertierende als auch invertierende Verstärker gibt es eine Vielzahl von Anwendungsfällen – wir wollen uns jedoch auf einige typische Beispiele aus der Praxis beschränken.

## 2. Nichtinvertierende Verstärker

### 2.1 Impedanzwandler (Puffer)



**Abb.3** Schaltung des Impedanzwandlers

Dieser Verstärker stellt eine gewaltige Verbesserung im Vergleich zum einfachen Emitterfolger dar, wie Sie feststellen werden. Bauen Sie die Schaltung gemäß Abb.3 auf! Legen Sie am Eingang ein sinusförmiges Signal an und prüfen Sie, ob die Verstärkung gemäß der Theorie tatsächlich genau 1 ist! Schalten Sie verschiedene große Widerstände in Reihe mit der Signalquelle und prüfen Sie damit nach, ob die Eingangsimpedanz tatsächlich sehr hoch ist! Bestimmen Sie die Bandbreite, d.h. die obere Grenzfrequenz (-3dB-Punkt)!

Im Prinzip führt die (interne) Gegenkopplung des OPV zu einer vernachlässigbaren Ausgangsimpedanz dieses Verstärkers. Allerdings können OPV immer nur einen begrenzten (d.h. endlichen) Ausgangsstrom liefern. Um diesen Effekt zu beobachten, legen Sie am Eingang ein Sinussignal von einigen Volt (Spitze-Spitze) an:

Verringern Sie nun den Lastwiderstand am Ausgang schrittweise soweit, bis Sie deutliche Anzeichen von Strombegrenzung beobachten! Das sollte bei einem Ausgangsstrom von etwa 30 mA geschehen. Diese Tatsache ist ein ernsthafter Nachteil, wenn niederohmige Lasten angesteuert werden müssen. Später werden wir Schaltungsmaßnahmen zur Lösung dieses Problems kennen lernen.

## 2.2 Nichtinvertierender Spannungsverstärker

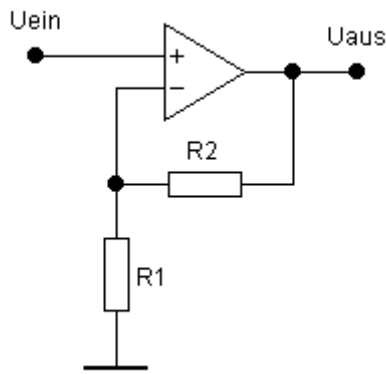


Abb.4 Schaltung des nichtinvertierenden Spannungsverstärkers

Zunächst bauen Sie einen Verstärker mit z.B. 20-facher Verstärkung gemäß der Abb.4 auf.

Messen Sie nun die obere Grenzfrequenz (-3 dB-Punkt) auch für diese Schaltung! Sie sollte kleiner sein als für den Impedanzwandler. Sie sollten in der Lage sein, diese obere Grenzfrequenz unter Berücksichtigung des Gegenkopplungsverhältnisses und der bekannten Grenzfrequenz für die Leerlaufverstärkung (-3 dB-Punkt bei 10 Hz) zu bestimmen. Überzeugen Sie sich davon, dass der Verstärker mit gegeneinander vertauschten Eingängen nicht funktioniert!

## 3. Invertierende Verstärker

### 3.1 Spannungsverstärker, Leerlaufverstärkung

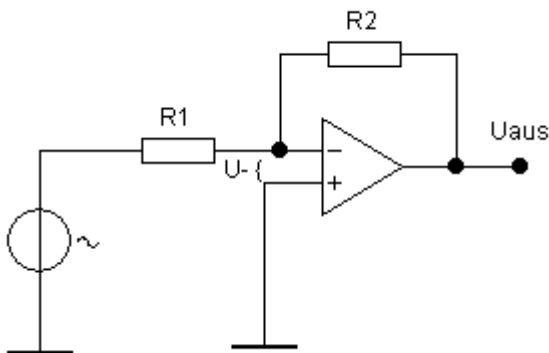


Abb.5 Messung der Leerlaufverstärkung eines OPV

Bauen Sie die in Abb.5 dargestellte Schaltung für eine Verstärkung von -10 auf!

Betreiben Sie die Schaltung mit einem ausreichenden Eingangssignal, so dass ein noch unverzerrtes Ausgangssignal von etwa 10 V (Spitze-Spitze) geliefert wird! Messen Sie unter Verwendung der Tastspitze des Oszilloskops die Spannung am invertierenden Eingang sowie am Ausgang bei veränderlicher Frequenz: Das Verhältnis dieser beiden Größen wird *Leerlaufverstärkung* (oder -entsprechend dem englischen Begriff "open loop gain"- *offene Schleifenverstärkung*) genannt.

Bei niedrigen Frequenzen ist die Leerlaufverstärkung groß, die Gegenkopplung wirkungsarm und die Spannung am invertierenden Eingang klein. Mit steigender Frequenz fällt die Leerlaufverstärkung ab, der OPV weicht vom Idealverhalten immer mehr ab und die Spannung am invertierenden Eingang wächst. Um diesen Effekt zu zeigen, nehmen Sie Messungen bei Frequenzen von 0.1, 1, 10 und 100 kHz vor!

### 3.2 Addierer

Nehmen wir an, dass Sie zwei Spannungen addieren möchten, z.B. eine Gleichspannung von 3.2 V und eine Wechselfspannung der Form  $0.1V \cdot \sin(\omega t)$ . Führen Sie diese Analogrechenoperation mit dem einfachen Addierer gemäß der folgenden Abb. 6 aus! Dimensionieren Sie die Widerstände sinnvoll und prüfen Sie für die o.g. Eingangssignale den tatsächlichen Signalverlauf am Ausgang nach! Die Beziehung in Abb.6 gilt *nur* für drei gleiche Widerstände: Überzeugen Sie sich durch Änderung von einem der beiden Eingangswiderstände auch davon, dass tatsächlich eine Addition mit Wichtung ausgeführt wird!

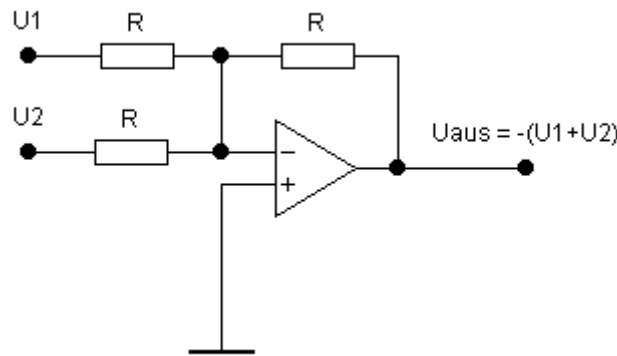


Abb.6 Einfacher Addierer für zwei Spannungen

3.3 Strom-Spannungs-Wandler

Die Photodiode ist ein Beispiel für eine Stromquelle bzw. einen Signalwandler: Auf die (in Sperrrichtung geschaltete) Diode einfallendes Licht erzeugt zusätzliche Ladungsträger und damit einen Photostrom. Benutzen Sie die dargestellte Schaltung in Abb.7, um einfallendes Licht in ein Spannungssignal umzuwandeln.

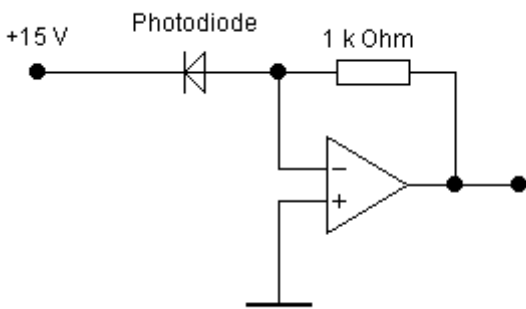


Abb.7 Schaltung für Strom-Spannungs-Wandler

Benutzen Sie eine in Sperrrichtung vorgespannte Photodiode als Stromquelle. Beobachten Sie die Änderung des Ausgangssignals bei Variation der einfallenden Lichtintensität. Schirmen Sie die Photodiode gegen das Umgebungslicht ab. Wie groß ist der Photostrom der Diode?

Mit Sicherheit können Sie auch ein Störsignal mit 50 bzw. 100 Hz beobachten: Woher kommt das? Versuchen Sie, dieses Signal durch einen Kondensator parallel zum Gegenkopplungswiderstand auszufiltern!

Mit Erhöhung der Kapazität sollte das Ausgangssignal immer "glatter" werden. Was geschieht aber mit der Reaktionszeit ihrer Schaltung? Wie begründen Sie den Befund?

4. Grenzen von OPV

In diesem Abschnitt sollen grundlegende Eigenschaften realer OPV untersucht werden, die für den praktischen Einsatz von besonderer Bedeutung sind und die Einsatzmöglichkeiten begrenzen.

4.1 Slew Rate

Die sogenannte "slew rate" ist gegeben durch das Maximum von  $\frac{du_{aus}}{dt}$  und damit ein Maß für die maximale mögliche

Änderungsgeschwindigkeit der Ausgangsspannung des OPV. Angenommen, dass das Ausgangssignal von der Form  $A \cdot \sin(\omega t)$  ist, dann gibt die slew rate den maximalen Wert der Größe  $\omega A$  an, die der OPV noch liefern kann.

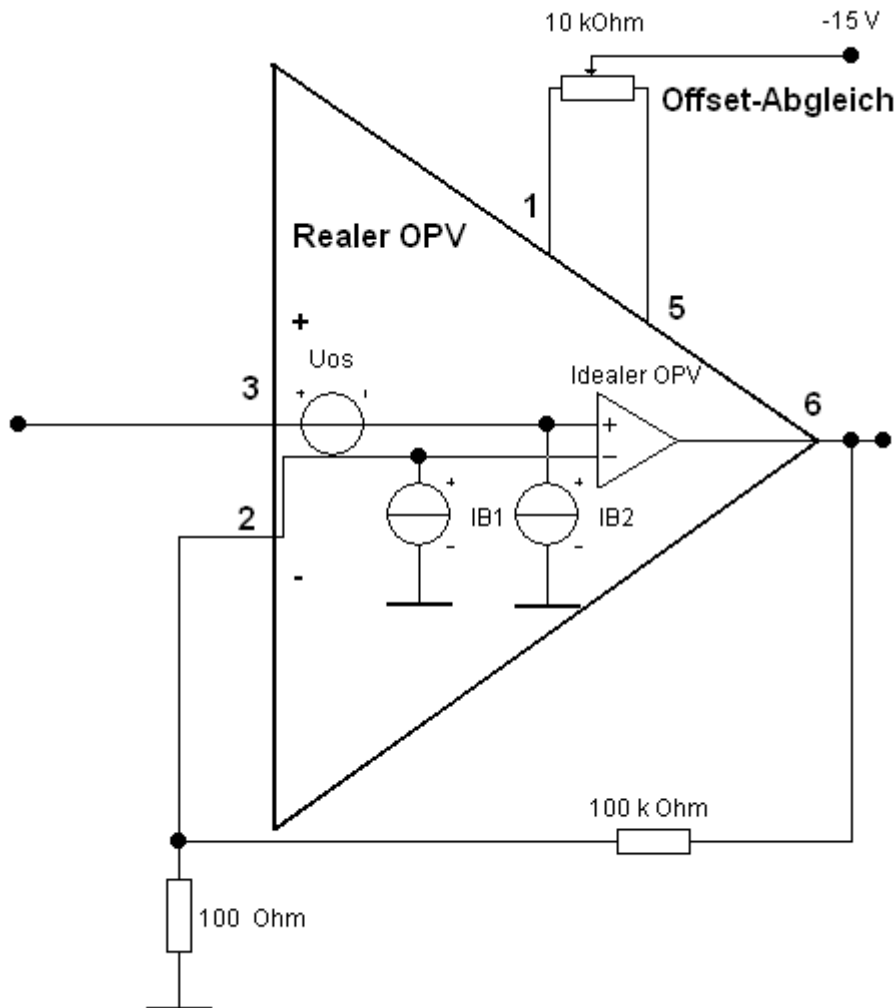
Beschalten Sie einen OPV für eine invertierende Verstärkung von -10! Verwenden Sie ein ausreichendes sinusförmiges Eingangssignal, so dass am Ausgang ein Signal von 20 V (Spitze-Spitze) entsteht! Erhöhen Sie allmählich die Frequenz: Sobald Sie die Grenze der slew rate erreichen, bekommt das Ausgangssignal eine dreieckige Wellenform, deren Anstieg der slew rate entspricht. Sie sollte für den OPV 741 bei etwa 0.5 V/μs liegen!

#### 4.2 Eingangsoffsetspannung und Eingangsruhestrom

Die Eingangstransistoren des (bipolaren) OPV benötigen einen kleinen Gleichstrom (Bias), der aus ihren Basisübergängen herausfließt. Dieser Eingangsruhestrom  $I_B$  muss aus den beiden Eingängen gegen die Masse fließen. Damit entsteht über jedem der an die Eingänge angeschlossenen Widerstände ein entsprechender Spannungsabfall.

Die Eingangsoffsetspannung entsteht durch die technologisch bedingte Fehlanpassung der Transistorfunktionen in der Differenzverstärkerstufe des OPV. Ihre Wirkung kann im Ersatzschaltbild durch eine zusätzliche Spannungsquelle mit einer kleinen Spannung  $U_{OS}$  beschrieben werden, die vor einen Eingang eines idealen OPV geschaltet ist.

Beide Sachverhalte sind in der folgenden Abb.8 veranschaulicht. Beide Größen sollen gemessen werden.

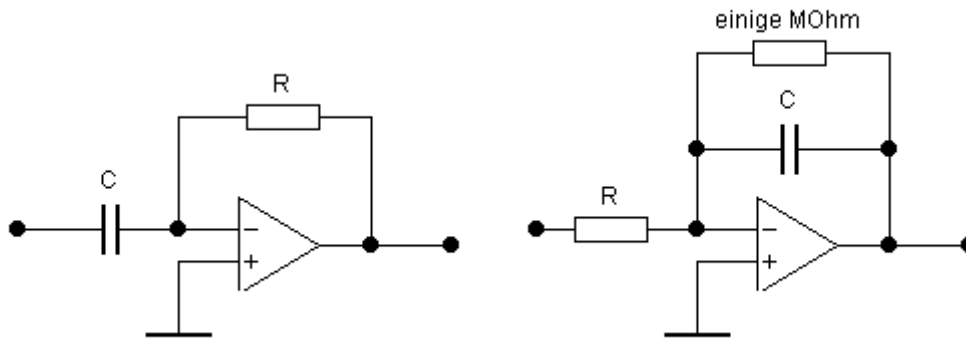


**Abb.8 Schaltung zur Messung von Eingangsoffsetspannung und Eingangsruhestrom**

Beschalten Sie den Verstärker für eine Verstärkung von 1000! Verbinden Sie einen geeigneten Widerstand mit dem nichtinvertierenden Eingang, um den Effekt des Eingangsruhestromes zu eliminieren und bestimmen Sie die Eingangsoffsetspannung durch Messung des Ausgangssignal bei bekannter Verstärkung! Die Offsetspannung lässt sich korrigieren mit einem 10 k $\Omega$  - Einstellwiderstand an den Offsetkompensationsanschlüssen (1 und 5), dessen Mittelabgriff an die negative Betriebsspannung angeschlossen ist. Nach vollzogener Offsetkompensation legen Sie einen 100 k $\Omega$ - Widerstand vom nichtinvertierenden Eingang zur Masse und verwenden den Verstärker zur Bestimmung von  $I_B$ ! Typisch sind ca. 100 nA für den OPV 741. OPV mit FET- Eingang haben viel geringere Eingangsruhestrome (einige pA).

### 5. Integrierer und Differenzierer

In Abb.9 sind die Schaltungen eines Differenzierers (Abb.9a) und eines Integrators (Abb.9b) dargestellt: Bauen Sie die Schaltungen nacheinander auf!



**Abb. 9. (a) Differenzierer und (b) Integrator**

Legen Sie jeweils ein Rechteck-Signal an den Eingang an und beobachten Sie das Ausgangssignal! Messen Sie die Frequenzabhängigkeit der Verstärkung und der Phasenverschiebung für ein sinusförmige Eingangssignal! Diskutieren Sie die Ergebnisse in Abhängigkeit vom Parameter  $\omega RC$ ! Für eine bessere DC-Stabilität ist ein größerer Widerstand (einige  $M\Omega$ ) parallel zum Integratorkondensator nötig: Erklären Sie dessen Wirkung!