
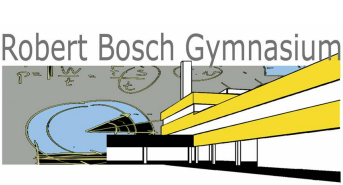


|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <p style="text-align: center;"><i>Robert-Bosch-Gymnasium</i><br/><b>Physik (2-/4-stündig), NGO</b></p> |  |
| <p>Praktikum<br/>Versuch Nr.: 3.4</p>   | <p style="text-align: center;">Block 3</p>   | <p style="text-align: right;">4.4.2011<br/>Seite - 1 -</p>                          |

## *Wirkungsweise und Anwendung von Operationsverstärkern*

### 1. Theoretische Grundlagen

#### **Vorbereitung:**

Zum Verständnis der Wirkungsweise eines Operationsverstärkers sollte die Funktion eines Transistorverstärkers bekannt sein; mache dich also - falls nötig - nochmals anhand eines Physikbuches mit der Arbeitsweise eines Transistors in Verstärkerschaltungen vertraut. Achte bei der Durcharbeitung des vorliegenden Skripts v. a. auf ein gutes Verständnis der Anwenderschaltungen.


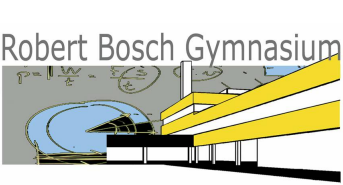
#### **Namensgebung, Grundsätzliches:**

Operationsverstärker sind integrierte Schaltkreise (engl.: integrated circuit = IC), die als fertige Bausteine meist im DIP-Gehäuse (DIP, engl.: dual inline package) angeboten werden. DIP-Gehäuse sind quadratisch oder rechteckig aufgebaute Kunststoffgehäuse mit zwei parallelen Reihen von Anschlussbeinchen; im vorliegenden Fall sind es nur 2 x 4, also 8 Beinchen. Die Verstärkereigenschaften des Operationsverstärkers lassen sich durch die äußere Beschaltung in weiten Grenzen variieren. Der „nackte“ Operationsverstärker wird eigentlich nie eingesetzt; dazu sind seine Verstärkereigenschaften viel zu extrem und sein „Innenleben“ viel zu empfindlich ohne äußeren „Schutz“.

Der Name „Operationsverstärker“ stammt aus der englischen Bezeichnung „operational amplifier“, das bedeutet „Rechenverstärker“; wie im Verlauf der vorliegenden Einführung gezeigt wird, kann der Operationsverstärker zum Beispiel als Addierer eingesetzt werden, also Rechenaufgaben lösen (er kann auch subtrahieren, integrieren, differenzieren...); abgekürzt bezeichnet man den Operationsverstärker deshalb auch als OpAmp oder OPA. Ursprünglich wurden Operationsverstärker für den Aufbau von Analogrechnern entwickelt.

Der „Oldie“ unter den Operationsverstärkern ist der „741“ (z. B. der LM 741 von Texas Instruments); er besteht aus 20 Transistoren, 11 Widerständen und einem Kondensator. Die Innenschaltung ist kompliziert, braucht uns aber bei der Anwendung auch nicht weiter zu beschäftigen. Wir betrachten den IC als „Black Box“. Die Innenschaltung bildet einen mehrstufigen galvanisch (direkt, also nicht über einen Kondensator) gekoppelten Gleichspannungsverstärker mit zwei Eingängen und einem Ausgang. Derjenige Eingang, bei dem das Ausgangsspannungssignal gegenüber dem Eingangssignal invertiert ist, heißt invertierender (-), der andere nicht-invertierender (+) Eingang.

Weitere sehr gebräuchliche Operationsverstärker sind außer dem LM 741 z. B. die Typen LF 355, LF 356 und LF 357 (von Siemens), der TL 071, der TL 072, der LM 309 u. a. Vor der Benutzung eines Operationsverstärkers müssen die technischen Daten (Verstärkereigenschaften) und die Pin-Belegung (Anschluss der Beinchen) bekannt sein.

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Robert-Bosch-Gymnasium</b><br><b>Physik (2-/4-stündig), NGO</b> |  |
| Praktikum<br>Versuch Nr.: 3.4   | Block 3  | 4.4.2011<br>Seite - 2 -   |

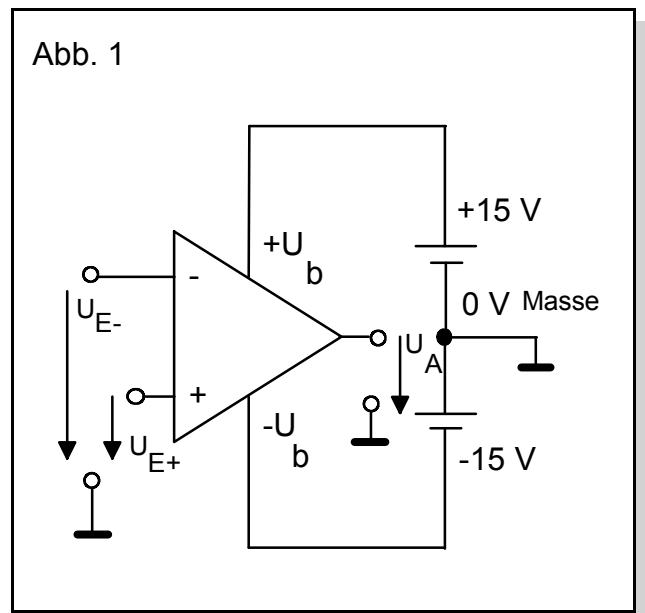
### Differenzverstärker:

Die Eingangsstufe des LM 741 ist eine Differenzverstärkerstufe. Differenzverstärker verstärken die Spannungsdifferenz zwischen ihren beiden Eingängen E1 und E2 (bzw. E- und E+). Damit die Ausgangsspannung relativ zur Schaltungsmasse sowohl positiv als auch negativ sein kann, wird ein Operationsverstärker meist mit einer sog. „symmetrischen“ Stromversorgung betrieben, d.h. in unserem Fall z.B. mit  $\pm 9\text{ V}$ ,  $\pm 12\text{ V}$ , oder  $\pm 15\text{ V}$ .

Abbildung 1 zeigt das Schaltsymbol eines Operationsverstärkers mit symmetrischer Stromversorgung; in Schaltbildern mit Operationsverstärkern werden die Stromversorgungsanschlüsse meist weggelassen.

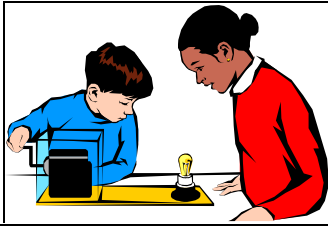
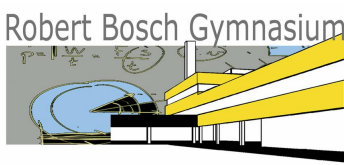
Die Eingangsspannungen  $U_{E-}$  und  $U_{E+}$  werden, ebenso wie die Ausgangsspannung  $U_A$ , relativ zur gemeinsamen Masse gemessen. Diese stellt den Potenzialmittelpunkt der symmetrischen Stromversorgung dar. Eine einfache symmetrische Stromversorgung erhält man durch die Serienschaltung zweier gleicher Batterien (z. B. zwei 9V-Blöcke). Die Masse ist dabei der Verbindungspunkt beider Batterien (Minuspol der einen, Pluspol der anderen).

Für die Versuchsdurchführung im Praktikum stehen allerdings Netzgeräte mit symmetrischen Ausgangsspannungen zur Verfügung, die sowohl konstant, als auch symmetrisch veränderbar sein können.



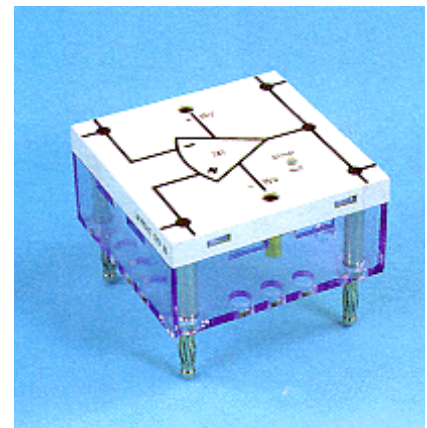
### Die elektrischen Daten des 741:

Der LM 741 besitzt die nachfolgend genannten elektrischen Daten. Beachte die Grenzwerte bitte bei der Versuchsdurchführung (z. B. maximale Versorgungsspannung). Wir benutzen im Experiment eine IC-Fassung, in welche die Beinchen des Operationsverstärker gesteckt werden, so dass er sehr leicht ausgetauscht werden kann. Im Versandhandel kostet der LM 741 momentan unter etwa 0,50 €. Hochwertige Operationsverstärker (z. B. MOS-FET-Bausteine der Fa. Burr Brown) können dagegen pro Stück 50 € und mehr kosten.

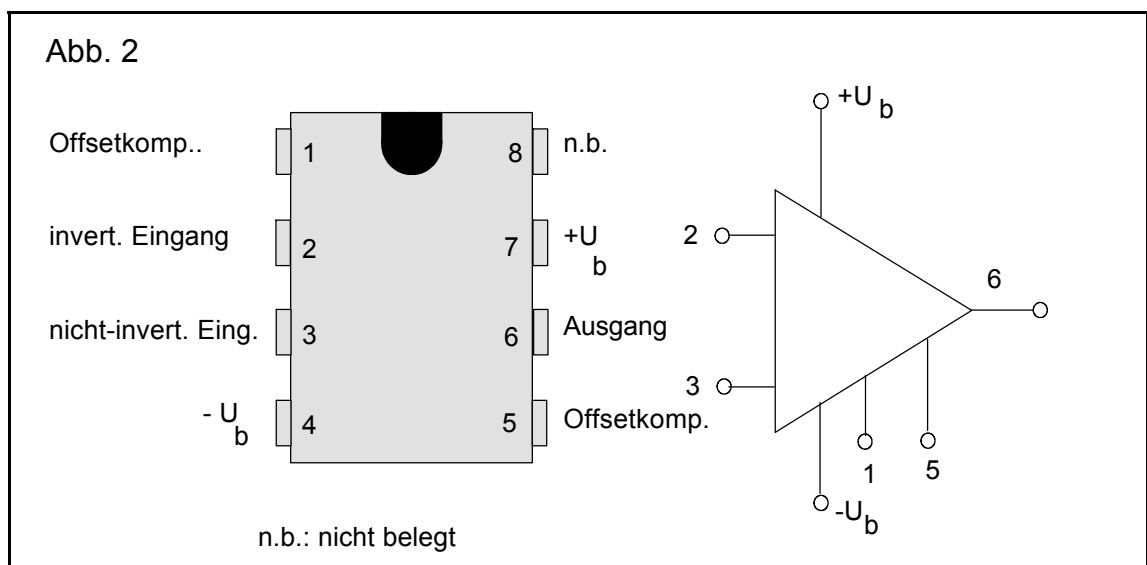
|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <p style="text-align: center;"><i>Robert-Bosch-Gymnasium</i><br/><b>Physik (2-/4-stündig), NGO</b></p> |  |
| <p>Praktikum<br/>Versuch Nr.: 3.4</p>   | <p style="text-align: center;">Block 3</p>   | <p style="text-align: right;">4.4.2011<br/>Seite - 3 -</p>                          |


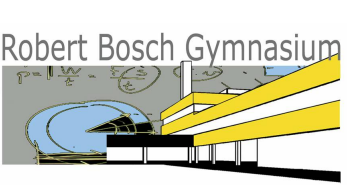
| Größe                            | Werte   |
|----------------------------------|---|
| maximale Betriebsspannung        | $\pm 18 \text{ V}$  |
| Ruhestrom                        | 1,7 mA  |
| max. Kurzschluss-Strom           | 10 mA   |
| max. Ausgangsspannung            | $\pm 14 \text{ V}$ (bei $\pm 18 \text{ V}$ Versorgungsspannung) |
| Eingangswiderstand               | 0,3 - 2 M $\Omega$  |
| Ausgangswiderstand               | 75 $\Omega$   |
| Eingangsfehlstrom                | 80 nA   |
| Spannungsverstärkung (open loop) | 100 000   |

Nebenstehende Abbildung zeigt ein Experimentiermodul mit Operationsverstärker; dieses Modell weist bereits eine äußere Beschaltung für den OpAmp auf, ist also für unsere Zwecke nicht geeignet; wir setzen den reinen Operationsverstärker auf IC-Sockel ein.



**Abb 2.: Pin-Belegung (von oben betrachtet) und Schaltsymbol:**



|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Robert-Bosch-Gymnasium</b><br><b>Physik (2-/4-stündig), NGO</b> |  |
| Praktikum<br>Versuch Nr.: 3.4   | Block 3  | 4.4.2011<br>Seite - 4 -   |

### Gleichtaktbetrieb des Operationsverstärkers:

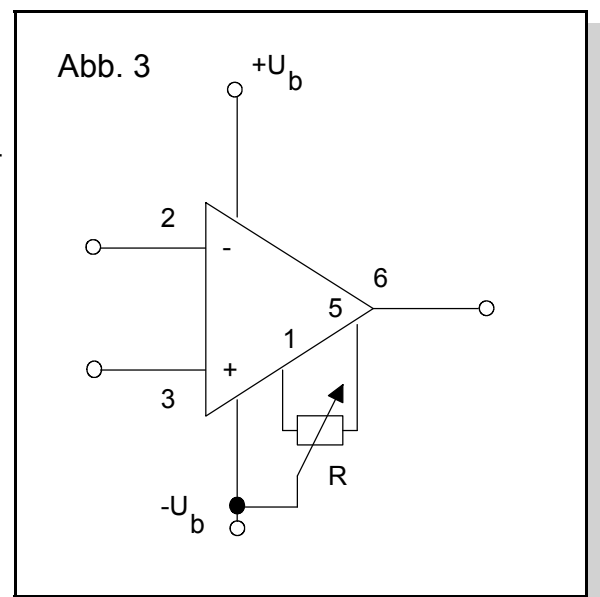
Legt man an die beiden Eingänge des Operationsverstärkers dieselbe Spannung an (Gleichtaktbetrieb), z. B. indem man die beiden Eingänge miteinander verbindet, so sollte die Ausgangsspannung im Idealfall natürlich Null Volt sein, denn der Operationsverstärker verstärkt ja die Differenz der Eingangsspannungen, die im vorliegenden Fall Null Volt beträgt.

Real verhält sich ein Operationsverstärker aber leider meistens nicht so, da die beiden Transistorstufen, welche den Differenzverstärkereingang bilden, nicht völlig identische elektrische Eigenschaften haben; es wird also auch dann eine (kleine) Ausgangsspannung entstehen, auch wenn keine Eingangsspannungsdifferenz vorliegt. Als Maß für die Unterdrückung dieser Ausgangsspannung im Gleichtaktbetrieb wird die sog. common mode rejection (Gleichtaktunterdrückung) des Operationsverstärkers angegeben; sie sollte bei einem guten Operationsverstärker einen möglichst großen Wert haben (siehe Datenblatt des Operationsverstärkers).


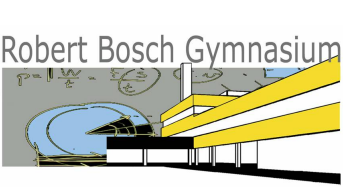
### Offsetkompensation:

Im Zusammenhang mit der Unsymmetrie der Eingangstransistoren kommt es auch vor, dass bei Eingangsspannung Null Volt an beiden Eingängen der Ausgang doch eine von Null Volt verschiedene Spannung zeigt, so als läge an einem der beiden Eingänge schon eine kleine Signalspannung an, deren Differenz zu Null Volt am anderen Eingang um den Verstärkungsfaktor verstärkt am Ausgang anliegt. Die meisten Operationsverstärker haben zur Kompensation dieser Fehlerspannung eine von außen zugängliche Möglichkeit zum Nullabgleich vorgesehen (Offsetspannungskompensation), sofern dies notwendig ist (etwa bei Gleichspannungsmessverstärkern).

Abb. 3. zeigt die beim LM 741 vorgesehene Möglichkeit zur Offsetspannungskompensation: ein  $10\text{ k}\Omega$ -Potentiometer verbindet die beiden Pins 1 und 5; der Abgriff wird auf negatives Betriebsspannungspotential gelegt.

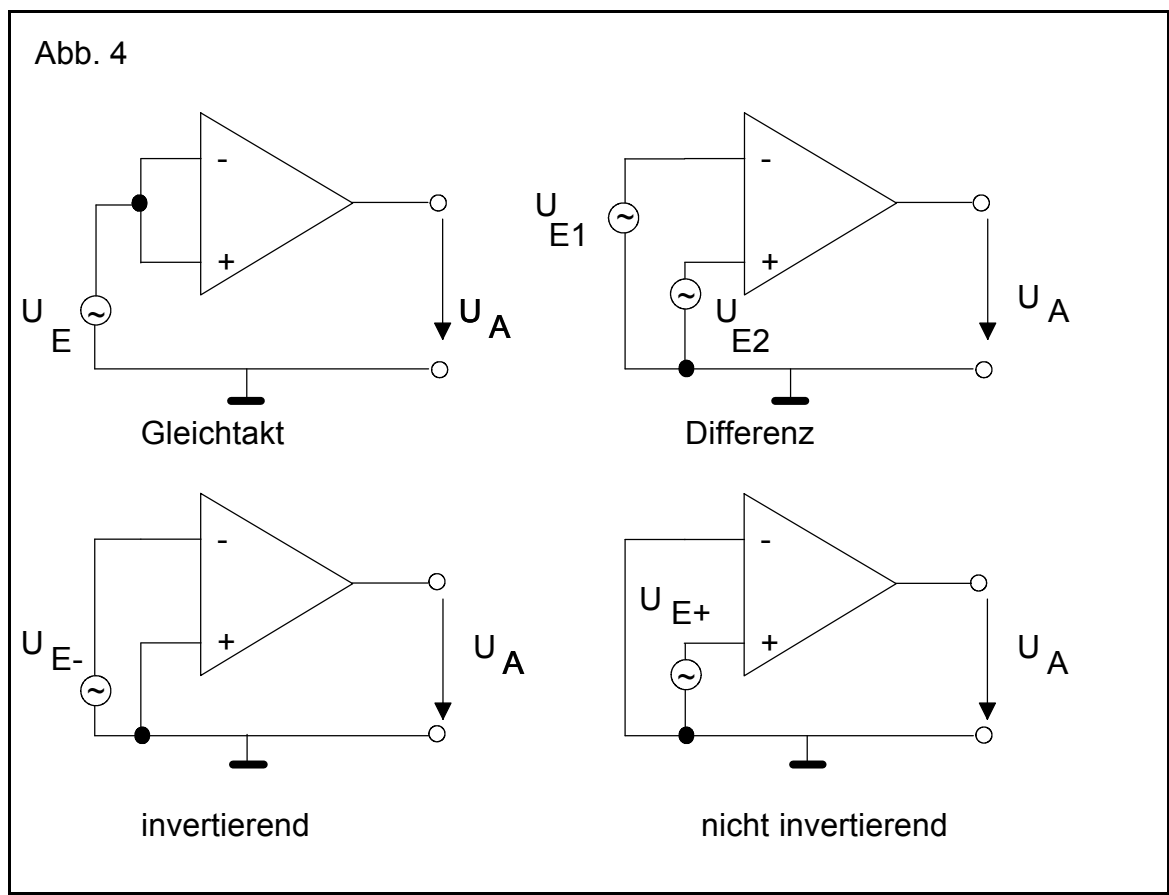


Intern werden durch diese Maßnahme die beiden Emitterwiderstände der Eingangstransistoren in der Differenzverstärkerstufe symmetriert.

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <b>Robert-Bosch-Gymnasium</b><br><b>Physik (2-/4-stündig), NGO</b> |  |
| Praktikum<br>Versuch Nr.: 3.4   | Block 3  | 4.4.2011<br>Seite - 5 -   |


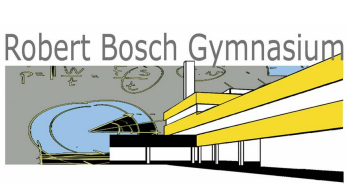
### Betriebsarten des Operationsverstärkers:

Der Operationsverstärker kann entweder im Gleichtaktbetrieb (hier ohne Anwendung), im Differenzbetrieb, im invertierenden oder im nichtinvertierenden Modus eingesetzt werden (s. dazu die Abb. 4). Vor allem die beiden letzten Schaltungen sind von großer praktischer Bedeutung.



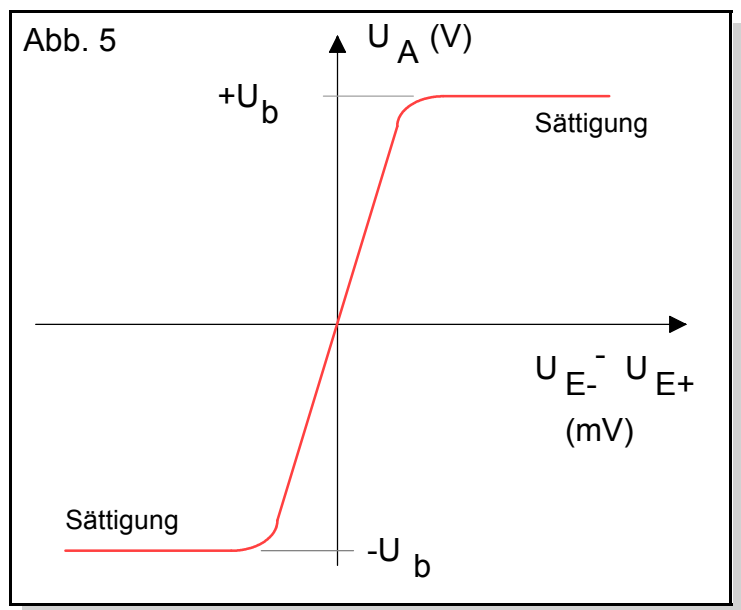
### Die Übertragungskennlinie von Operationsverstärkern:

Da die Leerlaufverstärkung (auch: offene Schleifenverstärkung, open loop gain) bei Operationsverstärkern sehr groß ist (beim 741 ist ein Faktor von 100 000 ein typischer Wert), führt bereits eine winzige Eingangsspannungsdifferenz zur Vollaussteuerung bzw. zur Übersteuerung (Sättigung) des Verstärkers. Die maximale Ausgangsspannung liegt aber logischerweise in beiden Richtungen (von der Masse aus betrachtet) unterhalb der jeweils benutzten Versorgungsspannung; bei  $\pm 18$  V Betriebsspannung beträgt also die maximale Ausgangsspannung ca.  $\pm 14$  V. Die Übertragungskennlinie (Ausgangsspannung, aufgetragen über der Differenz der Eingangsspannungen) ist in Abb. 5 dargestellt.

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <i>Robert-Bosch-Gymnasium</i><br><b>Physik (2-/4-stündig), NGO</b> |  |
| Praktikum<br>Versuch Nr.: 3.4   | Block 3  | 4.4.2011<br>Seite - 6 -   |

Man erkennt, dass bei kleinen Eingangsspannungsdifferenzen die Kennlinie linear verläuft, d. h. die Ausgangsspannung um den Verstärkungsfaktor (proportional) größer als die Eingangsspannungsdifferenz ist. Sobald diese aber bestimmte Grenzen überschreitet, ist die Ausgangsspannung schon so stark angestiegen, dass sie nicht weiter steigen kann; sie kann die angelegte Betriebsspannung ja nicht übertreffen. Insofern tritt Sättigung auf, d. h. auch ein Ansteigen der Eingangsspannungsdifferenz führt zu keiner weiteren Steigerung der Ausgangsspannung mehr.


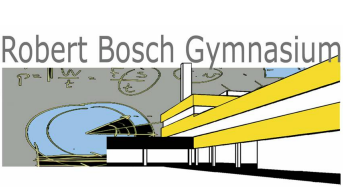
Die große Verstärkung des Operationsverstärkers kann im ersten Versuch gezeigt werden: hier arbeitet er als sogenannter Komparator und „vergleicht“ die Potenziale an seinen Eingängen.



In allen anderen Anwendungsfällen wird die große Verstärkung des Operationsverstärkers durch die äußere Beschaltung „gezügelt“; ohne eine durch die Außenbeschaltung verminderte Verstärkung neigt ein Operationsverstärker sonst stark zum Schwingen; außerdem ist ohne Gegenkopplung kaum ein stabiler Zustand (aufgrund der Offsetspannungen) möglich. Hinzukommt, dass die Leerlaufverstärkungen eines Operationsverstärkers von Exemplar zu Exemplar stark streuen, man bei Verwendung der reinen Leerlaufverstärkung also zu sehr unterschiedlichen Verstärkungsfaktoren bei jedem einzelnen Bauelement käme.

### Anwendungsschaltungen:

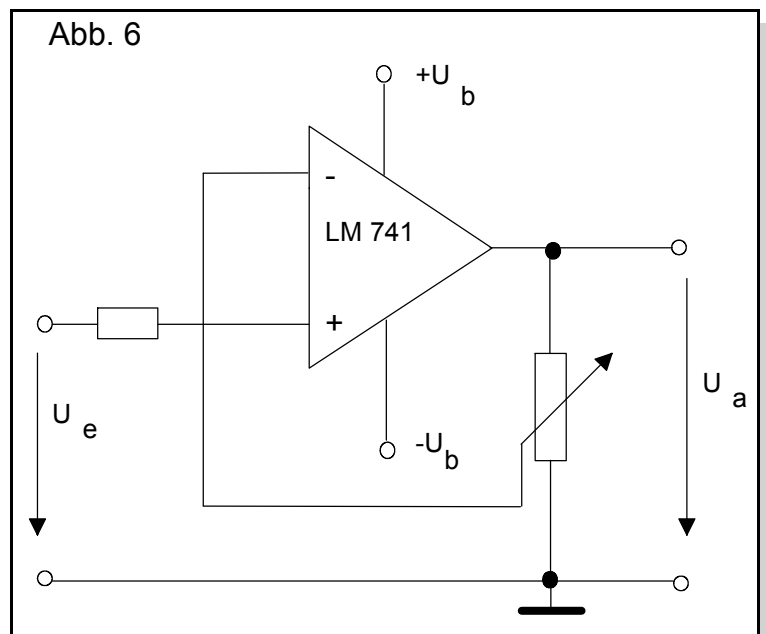
Die beste Methode, den Operationsverstärker als Verstärker mit linearem Gang zu verwenden, besteht in der Beschaltung mit Gegenkopplungswiderständen (engl.: closed loop gain - Verstärkung in geschlossener Schleife). Von Rückkopplung allgemein spricht man ja, wenn das Ausgangssignal eines Verstärkers auf das Eingangssignal wirkt und dieses beeinflusst; Mitkopplung ist der konstruktive Fall der Rückkopplung, d. h. rückgekoppeltes Ausgangssignal und Eingangssignal überlagern sich additiv; von Gegenkopplung redet man dagegen, wenn das rückgekoppelte Ausgangssignal destruktiv bzw. subtraktiv mit dem Eingangssignal überlagert ist. Bei der Gegenkopplung wirkt der Ausgang auf den invertierenden Eingang; so wird die Rückkopplung automatisch (durch die Vorzeichenumkehr bzw. Phasenverschiebung) zur Gegenkopplung.

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <i>Robert-Bosch-Gymnasium</i><br><b>Physik (2-/4-stündig), NGO</b> |  |
| Praktikum<br>Versuch Nr.: 3.4   | Block 3  | 4.4.2011<br>Seite - 7 -   |

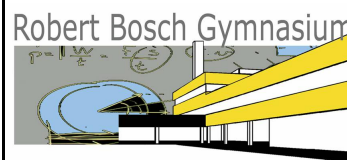
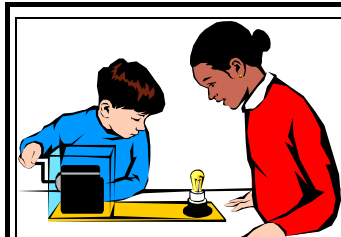
Am einfachsten verstehen kann man die Funktionsweise anhand der nachfolgenden Schaltung eines gegengekoppelten nichtinvertierenden Verstärkers (Abb. 6): die größere Ausgangsspannung wird an einen Spannungsteiler (Potentiometerschaltung) gelegt.

Ein - je nach dessen Schleiferstellung - größerer oder kleinerer Anteil dieser Ausgangsspannung wird über den invertierenden Eingang (damit) in Gegenphase zum Signal am Eingang des Verstärkers wieder zugeführt.

Die Spannungsdifferenz zwischen den beiden Eingängen sinkt deshalb in dem Maße, in dem die rückgekoppelte Ausgangsspannung (an E-) wächst. So kann die effektiv wirksame Verstärkung (Verstärkungsfaktor) beliebig eingestellt werden.

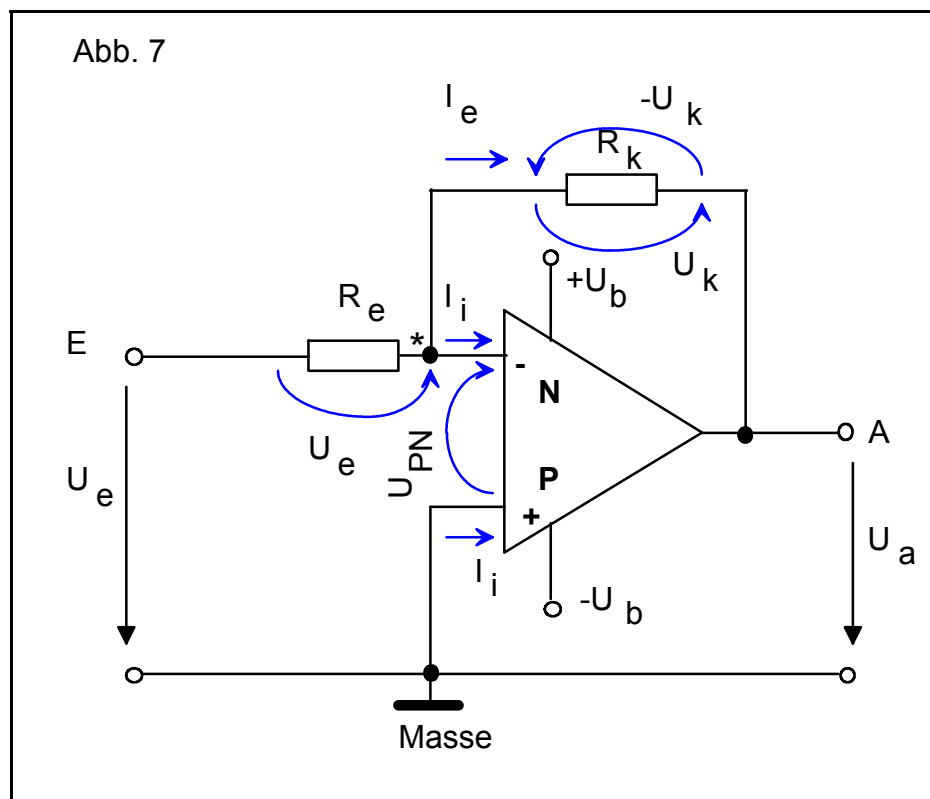


Ähnlich funktioniert die Rückkopplung auch beim invertierenden Verstärker (bei dem das Eingangssignal am invertierenden Eingang E- anliegt. Diese Verstärkerschaltung ist allerdings in ihrer Gesamtfunktionsweise etwas einfacher zu verstehen und zu berechnen, als der nichtinvertierende Verstärker. Deshalb leiten wir die benötigten Größengleichung aus seiner Funktionsweise ab.



### Der invertierende Verstärker:

#### Schaltung:



Es bedeuten:


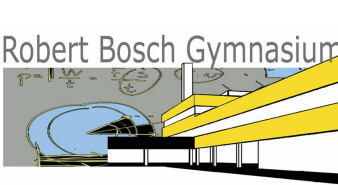
- $R_e$  Eingangswiderstand
- $R_k$  Rückkopplungswiderstand
- $U_b$  Betriebsspannung
- $U_e$  Eingangsspannung
- $U_a$  Ausgangsspannung
- \* virtueller Massepunkt
- $I_i$  Eingangsströme des Operationsverstärkers
- $I_e$  Eingangsstrom der Verstärkerschaltung

#### Erklärung:

$U_{PN}$  ist die Spannung zwischen dem P (+) und dem N (-) - Eingang des Operationsverstärkers. Die Eingangsströme  $I_i$  des Operationsverstärkers sind wegen dessen hohem Eingangswiderstand (viel größer als der Eingangswiderstand  $R_e$  der Schaltung!) sehr, sehr klein und liegen im Bereich von einigen (80 - 100) nA ( $1 \text{ nA} = 10^{-9} \text{ A}$ ). Vereinfachend dürfen wir annehmen, dass diese Ströme Null sind:  $I_i \cong 0 \text{ nA}$ .

Alle Ströme fließen vereinbarungsgemäß von + nach -, die Spannungspfeile zeigen in dieselbe Richtung.



|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <i>Robert-Bosch-Gymnasium</i><br><b>Physik (2-/4-stündig), NGO</b> |  |
| Praktikum<br>Versuch Nr.: 3.4   | Block 3  | 4.4.2011<br>Seite - 9 -   |

Der Verstärkereingangsstrom  $I_e$  fließt dann sozusagen gar nicht "in den Operationsverstärker hinein", sondern über  $R_e$  und  $R_k$  um ihn herum. Der nichtinvertierende Eingang liegt beim invertierenden Verstärker auf Massenequipotential. Da die Leerlaufverstärkung (offene Schleifenverstärkung, open loop gain,  $V \geq 100\,000$ ) ist, reicht zur Vollaussteuerung des Verstärkers ( $U_a \cong U_b$ ) = (z.B.) 12 V folgende Eingangsspannung aus:

$$V = -\frac{U_a}{U_e} \Rightarrow U_e = \frac{U_a}{V} = \frac{-12\text{ V}}{100\,000} = 120\mu\text{V} = 0,00012\text{ V}$$

Diese 120  $\mu\text{V}$  liegen also zwischen den beiden Eingängen:  $U_{PN} = 120\ \mu\text{V}$ . Da der Eingang P (nicht invertierend) auf Masse liegt, liegt wegen der geringen Spannung  $U_{PN} = 120\ \mu\text{V}$  auch der Eingang N (invertierend) auf annähernd gleichem Potential, also quasi auch auf Masse. Den Punkt \* bezeichnet man daher auch als sog. **virtuelle Masse** (wirkt sozusagen wie Masse).

Damit kann man von den Widerständen  $R_e$  und  $R_k$  folgende Ersatzschaltung (die elektrisch äquivalent zur obigen Schaltung ist - immer unter der Maßgabe der gemachten Prämisse) zeichnen:

Am Eingangswiderstand  $R_e$  der Verstärkerschaltung fällt die Eingangsspannung  $U_e$  ab. Da die Ausgangsspannung  $U_a$  von A zur Masse zeigt, zeigt sie auch zur virtuellen Masse im Punkt \*. Zugleich fließt der Eingangsstrom  $I_e$  ja über  $R_e$  und  $R_k$  in der gezeichneten Richtung, also ist  $U_k$ , die Spannung am Rückkopplungswiderstand, ebenfalls in diese Richtung gerichtet. Daraus folgt:

Daraus folgt dann:

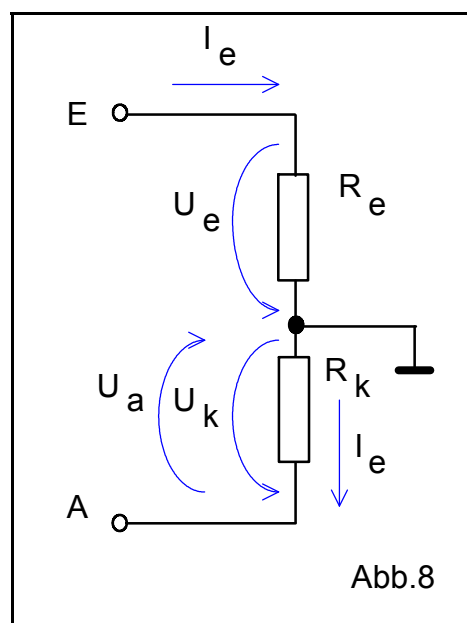
$$I_e = \frac{U_e}{R_e} \quad (1)$$


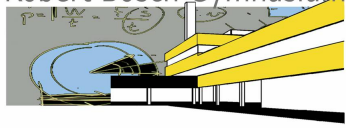
$$U_k = -U_a = I_e \cdot R_k \quad (2)$$

Aus den beiden Gleichungen (1) und (2) folgt:

$$-U_a = I_e \cdot R_k = \frac{U_e}{R_e} \cdot R_k$$

Somit erhält man für den Verstärkungsfaktor V:



|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <p style="text-align: center;"><i>Robert-Bosch-Gymnasium</i><br/><b>Physik (2-/4-stündig), NGO</b></p> | <p style="text-align: center;">Robert Bosch Gymnasium<br/></p> |
| <p>Praktikum<br/>Versuch Nr.: 3.4</p>   | <p style="text-align: center;">Block 3</p>   | <p style="text-align: right;">4.4.2011<br/>Seite - 10 -</p>   |

$$V = \frac{-U_a}{U_e} = \frac{R_k}{R_e}$$

d. h.:

Die Spannungsverstärkung  $V$  (Verstärkungsfaktor) beim invertierenden Verstärker hängt nur von der äußeren Beschaltung mit den beiden Widerständen  $R_e$  und  $R_k$  (deren Verhältnis) ab. Durch entsprechende Wahl dieses Widerstandsverhältnisses kann also eine nahezu beliebige Spannungsverstärkung erreicht werden. (In der Praxis sollte pro Verstärkerstufe ein Faktor von 100 - 1000 nicht überschritten werden.) Die Verstärkung, die man tatsächlich nutzt, sollte also deutlich unter der Leerlaufverstärkung von ca. 100 000 bleiben.

### Der nichtinvertierende Verstärker:

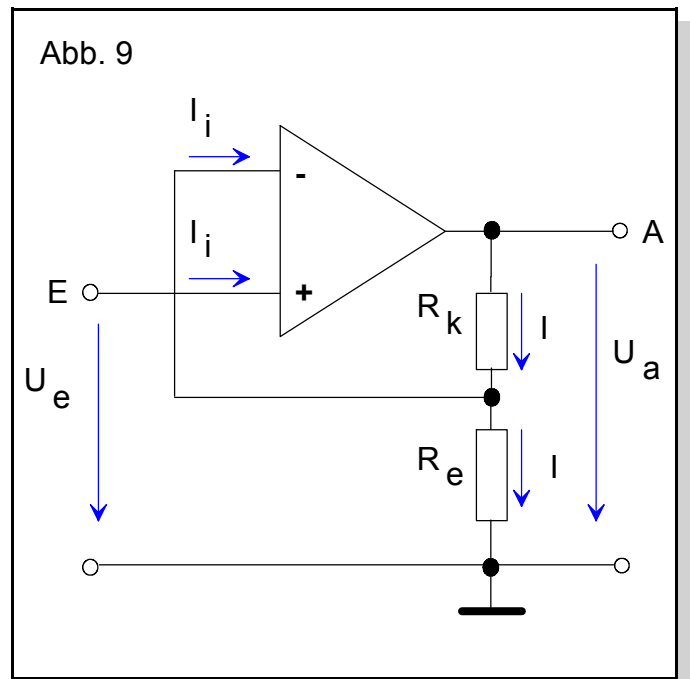
Bei diesem Verstärker ist das Ausgangs- gegen das Eingangssignal **nicht** invertiert. Der Eingangswiderstand ist groß, die Spannungsverstärkung ist stets mindestens 1.


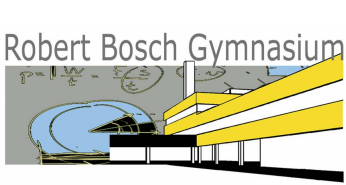
Der Eingang ist hier direkt der Eingang des Operationsverstärkers; deshalb ist der wirksame Eingangswiderstand der des Operationsverstärkers und somit recht groß (1 M $\Omega$ ). Der Widerstand  $R_k$  bewirkt eine negative Rückkopplung (Gegenkopplung): am Spannungsteiler aus  $R_k$  und  $R_e$  liegt die Ausgangsspannung. Die Teilspannung, die an  $R_e$  abfällt, wird abgegriffen und gegenphasig über den N-Eingang (-) dem Verstärker wieder zugeführt.

Wie man zeigen kann, gilt für die Ausgangsspannung  $U_a$ :

$$U_a = U_e \cdot \frac{R_e + R_k}{R_e}$$

Für die Spannungsverstärkung (Verstärkungsfaktor) des nichtinvertierenden Verstärkers erhält man daraus also:



|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <i>Robert-Bosch-Gymnasium</i><br><b>Physik (2-/4-stündig), NGO</b> |  |
| Praktikum<br>Versuch Nr.: 3.4   | Block 3  | 4.4.2011<br>Seite - 11 -  |

$$V = \frac{U_a}{U_e} = \frac{R_e + R_k}{R_e} = 1 + \frac{R_k}{R_e} \geq 1$$

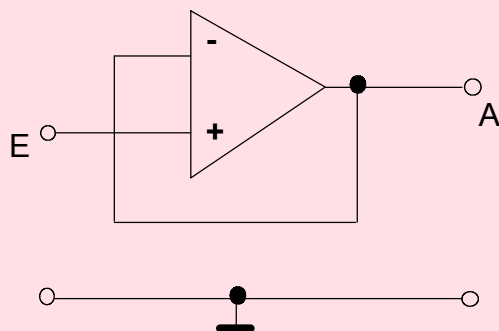
Sind die beiden Widerstände beispielsweise gleich ( $R_e = R_k$ ), so wird der Verstärkungsfaktor  $V = 2$ .


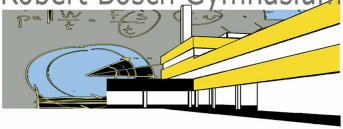
Verringert man den Wert des Rückkopplungswiderstands, bis schließlich  $R_k = 0 \Omega$ , indem man den Ausgang direkt mit dem N-Eingang (-) verbindet, so wird die Spannungsverstärkung  $V = 1$ .  $R_e$  kann man beliebig groß machen, z. B. (nahezu) unendlich groß, indem man ihn weglässt. Dann erhält man die in Abb. 10 dargestellte Schaltung.

Es handelt sich dabei um einen sog. **Elektrometerverstärker**. Man könnte sich fragen, was der Sinn eines "Verstärkers" mit Verstärkungsfaktor  $V = 1$  ist. Schließlich hat die Ausgangsspannung genau denselben Wert wie die Eingangsspannung. Die Schaltung heißt aus diesem Grund auch Spannungsfollower (die Ausgangsspannung folgt genau der Eingangsspannung).

Interessant an der Sache ist, dass sich der Widerstand (Impedanz) stark verändert: der Eingangswiderstand ist der (besonders bei MOS-FET-Operationsverstärkern) große bis sehr große (einige  $10^6 \Omega$  bis  $10^{15} \Omega$ ) Eingangswiderstand des Operationsverstärkers selbst; der Ausgangswiderstand ist dagegen klein (im Bereich von  $100 \Omega$ ). Es wird also zur Ansteuerung des Verstärkers nur ein winziger Strom benötigt; der Verstärker liefert aber einen genügend großen Strom, um beispielsweise ein Messinstrument zu betreiben. Diese Verstärkerschaltung ist deshalb bei Ladungsmessverstärkern nützlich (die zu messende Ladung - meist auf einem Kondensator "geparkt" - soll ja nicht abfließen, aber doch gemessen werden).

**Abb. 10**



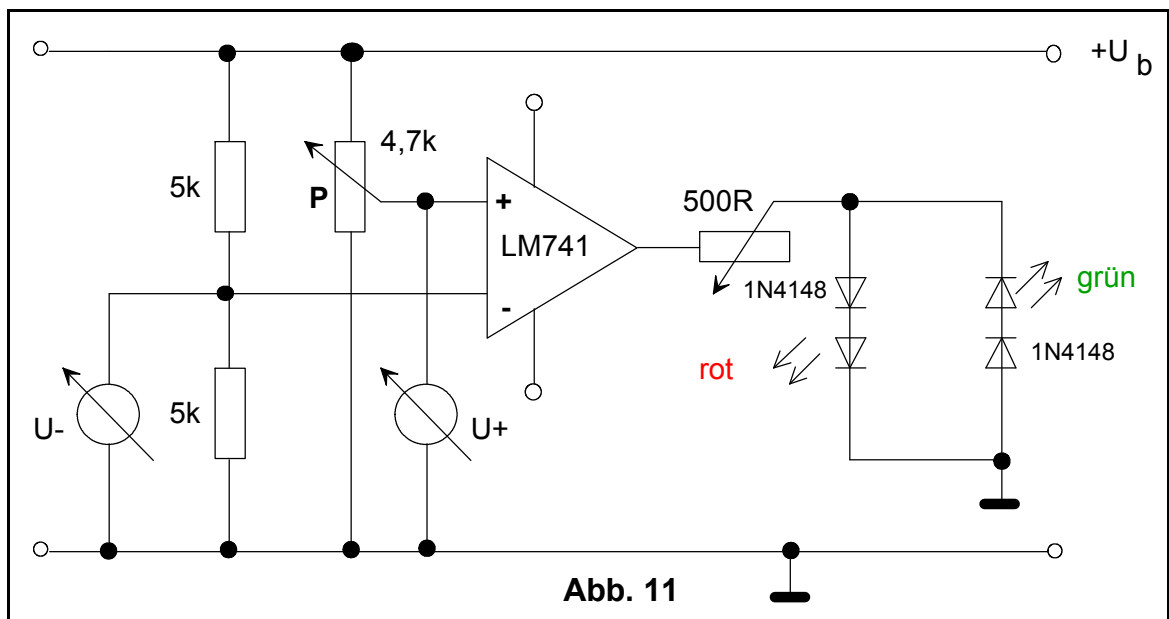
|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <p><i>Robert-Bosch-Gymnasium</i><br/> <b>Physik</b> (2-/4-stündig), NGO</p> | <p>Robert Bosch Gymnasium<br/> </p> |
| <p>Praktikum<br/> Versuch Nr.: 3.4</p>  | <p>Block 3</p>  | <p>4.4.2011<br/> Seite - 12 -</p>  |

## 2. Messaufgaben, Durchführung

### Versuch 1:

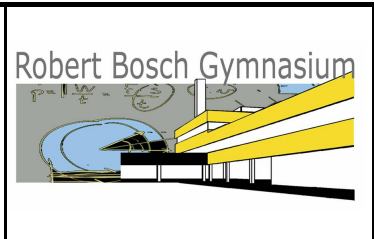
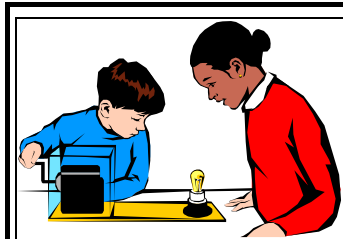
Baue nachfolgend (Abb. 11) dargestellte Schaltung auf. Es handelt sich um eine sog. Komparatorschaltung.

Verstelle das Potentiometer **P** und beobachte, was dann passiert. Messe die Spannungen  $U_-$  und  $U_+$  bei ver-



schiedenen Stellungen des Potentiometerabgriffs.

Versuche, die Funktionsweise des Komparators zu verstehen und halte deine Interpretation neben den Messwerten im Protokoll fest. Warum heißt der Komparator so?



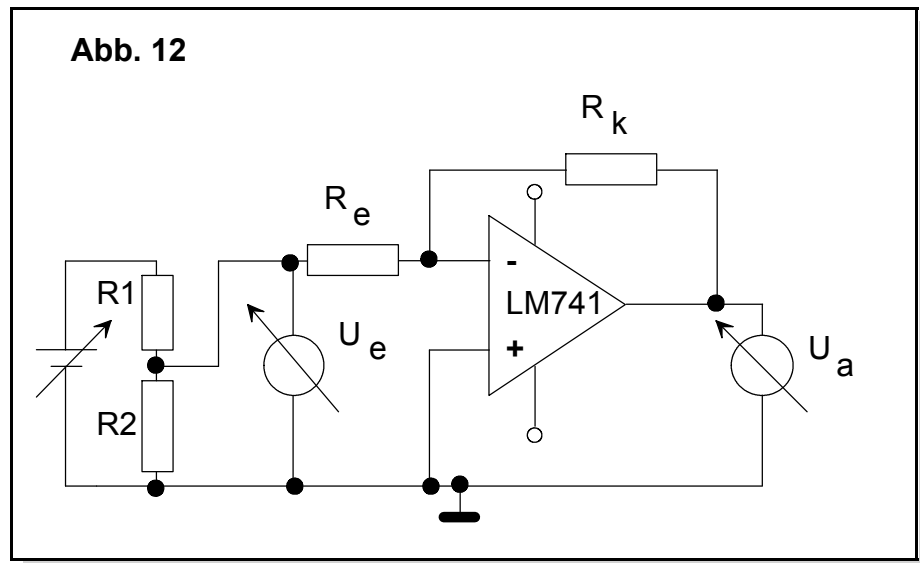
### Versuch 2:

Baue nun die nachfolgend (Abb. 12) dargestellte Schaltung des invertierenden Verstärkers auf:

- IC: LM 741
- R1: 4,7 k $\Omega$
- R2: 100  $\Omega$
- R<sub>e</sub>: 1 k $\Omega$
- R<sub>k1</sub>: 1 k $\Omega$
- R<sub>k2</sub>: 10 k $\Omega$

U<sub>b</sub>:  $\pm 12$  V

Die Messung wird nacheinander mit zwei unterschiedlich großen Rückkopplungswiderständen ausgeführt.



U<sub>e</sub> wird mit einem (Digital-)Voltmeter gemessen; die Gleichspannung, die an der Potentiometerschaltung aus R1 und R2 abgenommen wird, stammt aus einem gut stabilisierten Gleichspannungsnetzgerät mit variabler Ausgangsspannung. Die symmetrische Spannungsversorgung für den Operationsverstärker beziehen wir wieder aus einem entsprechend geeigneten symmetrischen Netzteil.

Vergiss nicht, die Masse der symmetrischen Spannungsversorgung mit dem negativen Pol der Gleichspannungsquelle zu verbinden!

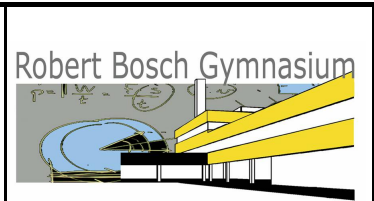
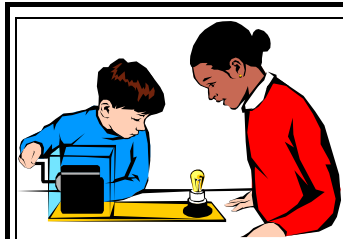
Zur Messung ist eine Messwertetabelle nachfolgenden Aussehens anzufertigen:

|                                 | U <sub>e</sub> / V  |  |
|---------------------------------|---------------------|--|
| R <sub>k1</sub> = 1 k $\Omega$  | -U <sub>a</sub> / V |  |
| R <sub>k2</sub> = 10 k $\Omega$ | -U <sub>a</sub> / V |  |

### Auswertung:

Stelle graphisch U<sub>a</sub> als Funktion von U<sub>e</sub> dar!

Diskutiere die Ergebnisse!



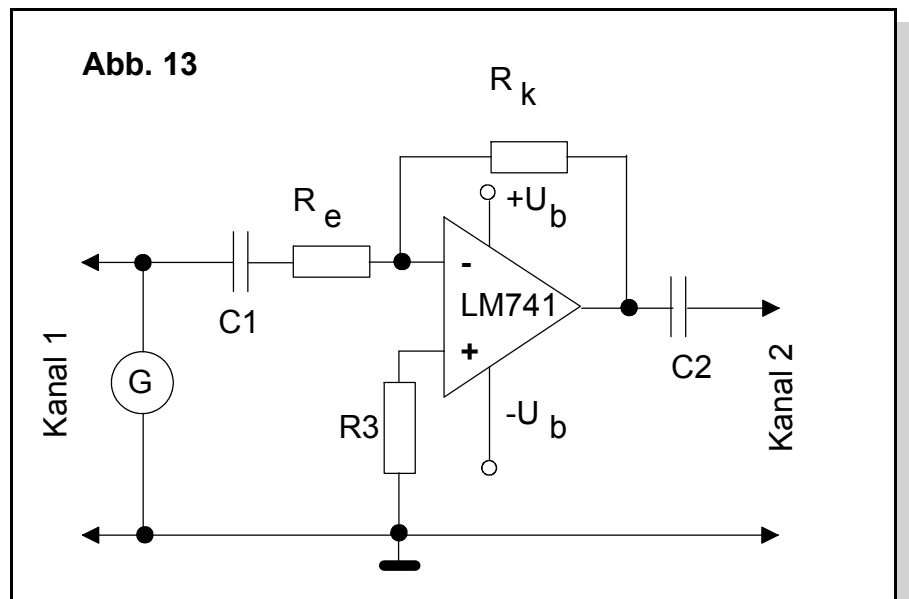
### Versuch 3:

Bauen Sie nachfolgende Schaltung eines invertierenden Wechselspannungsverstärkers auf:

$R_e$ : 10 k $\Omega$   
 $R_{k1}$ : 100 k $\Omega$   
 $R_{k2}$ : 1 M $\Omega$   
 $R_3$ : 10 k $\Omega$   
 (dient der thermischen Stabilisierung)

$C_1=C_2$ : 1  $\mu$ F

$U_b$ :  $\pm 12$  V  
 $U_e$ : 10 - 50 mV  
 (Amplitude)




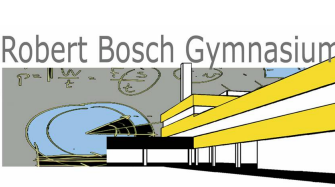
Weitere Geräte:

- Funktions- oder Sinusgenerator
- Zweikanaloszilloskop

Fülle während der Messung bitte eine Tabelle nachfolgend dargestellter Art aus; die Eingangsspannung soll von 10 mV bis 50 mV variiert werden.

|                                |                   |  |
|--------------------------------|-------------------|--|
|                                | $U_e / \text{mV}$ |  |
| $R_{k1} = 100 \text{ k}\Omega$ | $U_a / \text{V}$  |  |
| $R_{k2} = 1 \text{ M}\Omega$   | $U_a / \text{V}$  |  |

Berechne die Verstärkung des Verstärkers in beiden Fällen theoretisch und gib dazu auch den *gemessenen* Verstärkungsfaktor an! Diskutiere die Ergebnisse!

|   |  |   |
|---|--|---|
|  | <p style="text-align: center;"><i>Robert-Bosch-Gymnasium</i><br/><b>Physik (2-/4-stündig), NGO</b></p> |  |
| <p>Praktikum<br/>Versuch Nr.: 3.4</p>   | <p style="text-align: center;">Block 3</p>   | <p style="text-align: right;">4.4.2011<br/>Seite - 15 -</p>                         |

#### Versuch 4:

Bauen Sie nachfolgende Schaltung eines Summierverstärkers (Addierers) auf. Die Schaltung erhält zwei Wechselspannungen zugeführt. Um die beiden Eingangs(wechsel)spannungen und die Ausgangs(wechsel)spannung sicht- und messbar machen zu können, benötigen wir ein Dreikanaloszilloskop. Mache dich anhand der Bedienungsanleitung mit dessen Benutzung vertraut.

$$R_{e1}: 100 \text{ k}\Omega$$

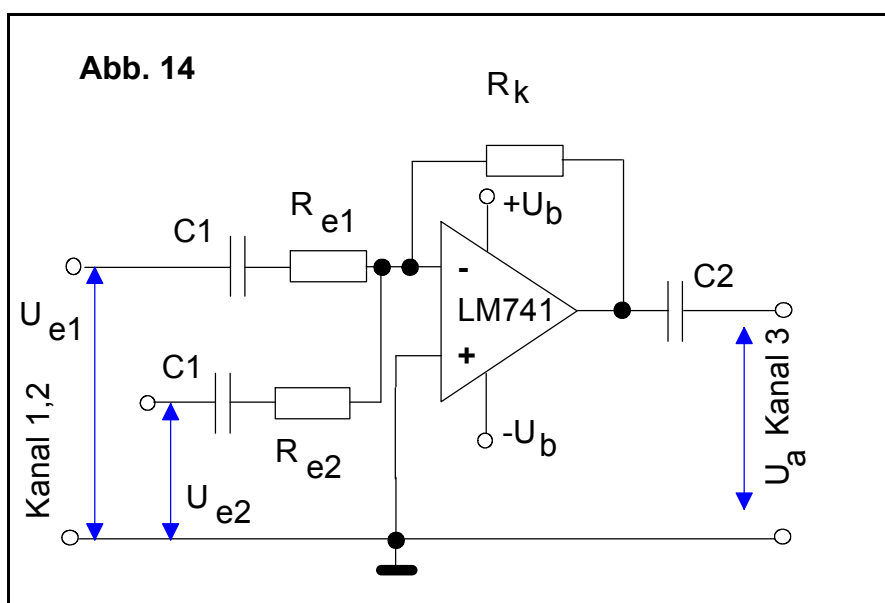
$$R_{e2}: 100 \text{ k}\Omega$$

$$R_k: 47 \text{ k}\Omega$$

$$C_1=C_2: 1 \mu\text{F}$$

$$U_b: \pm 12 \text{ V}$$

$$U_{e1,2}: 1 \text{ V (Ampl.)}$$



Weitere Geräte:

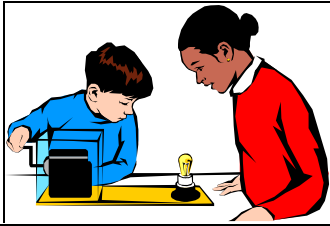

- ◆ 2 Funktionsgeneratoren (baugleich)
- ◆ 3-Kanaloszilloskop

Speise an den beiden Eingängen zwei Wechselspannungen mit gleicher Amplitude (1 V) ein. Beide Signale sollen zunächst dieselbe Frequenz besitzen. Da analog arbeitende Funktionsgeneratoren die Frequenz nie längere Zeit ganz konstant halten können und die Frequenz auch nicht auf 1 Hz genau eingestellt werden kann, behilft man sich zum ersten Teil des Experimentes am besten dadurch, dass man nur einen Funktionsgenerator benutzt und die Ausgangsspannung parallel an die beiden Eingänge der Summierschaltung legt.

Messe die Eingangsspannungen und die Ausgangsspannungen mit dem Oszilloskop; vergleiche! Notiere deine Ergebnisse.

Benutze jetzt zwei Funktionsgeneratoren; versuche, diese auf möglichst gleiche Frequenz einzustellen; lege an die Eingänge jetzt Signale mit verschiedener Amplitude; messe wieder die Ausgangsspannung.

Zum Schluss können auch Signale gleicher Amplitude bei verschiedener Frequenz oder ganz beliebige Signale angelegt werden. "Spiele" ein bisschen mit den Möglichkeiten; beobachte immer das Ausgangssignal!

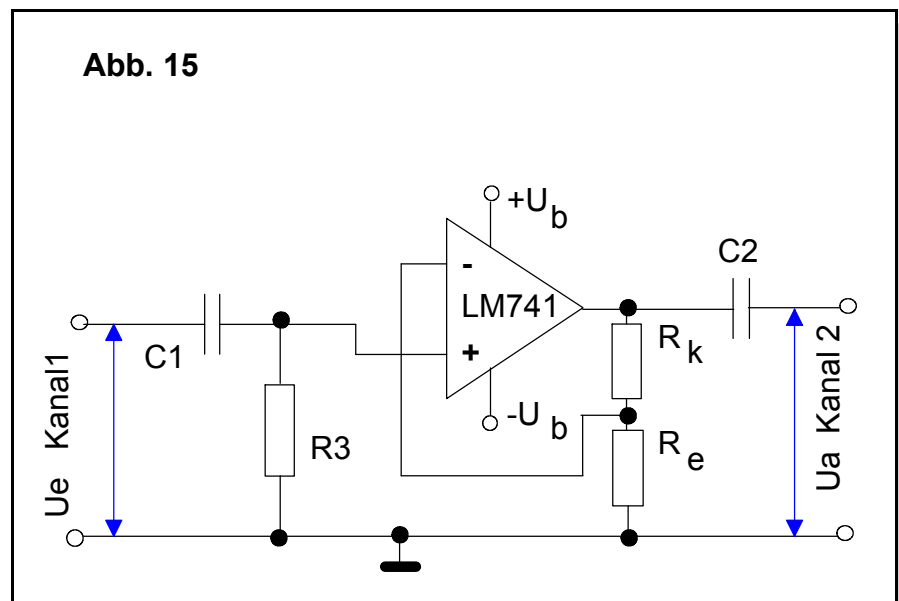
|   |   |  |
|---|---|--|
|  | <p><i>Robert-Bosch-Gymnasium</i><br/> <b>Physik (2-/4-stündig), NGO</b></p> | <p>Robert Bosch Gymnasium<br/> </p> |
| <p>Praktikum<br/>         Versuch Nr.: 3.4</p>                                    | <p>Block 3</p>  | <p>4.4.2011<br/>         Seite - 16 -</p>  |

### Versuch 5:

Bauen Sie nachfolgende Schaltung eines nichtinvertierenden Wechselspannungsverstärkers auf:

$R_e$ : 1 k  $\Omega$   
 $R_k$ : 100 k  $\Omega$   
 $R_3$ : 100 k  $\Omega$

$C_1=C_2$ : 1  $\mu$  F  
 $U_b$ :  $\pm$  12 V  
 $U_{e1,2}$ : 50 mV V (Ampl.)



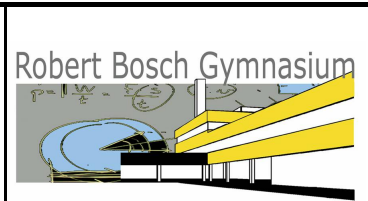
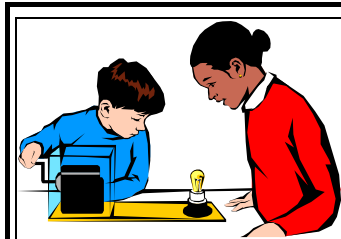
Weitere Geräte:

- Funktionsgenerator
- Zweikanaloszilloskop

Speise am Eingang die angegebene Sinusspannung ein und überprüfe diese mit Hilfe von Kanal 1 am Zweikanaloszilloskop; messe (mit Kanal 2) relativ dazu Amplitude und Phasenlage des Ausgangssignals.

Berechne die Verstärkung des Verstärkers theoretisch und gib dazu auch den gemessenen Verstärkungsfaktor an! Diskutiere die Ergebnisse! Wie verhält sich die Phase des Ausgangssignal gegenüber Versuch Nr. 3.?





### Versuch 6:

Wenn jetzt noch Zeit für weitere Experimente bleibt: Baue nachfolgende Schaltung eines Elektrometerverstäkers auf und mache nachfolgende Experimente zu seiner Funktionsweise.

IC: LM 741

$C_1$ :  $100 \mu\text{F}$

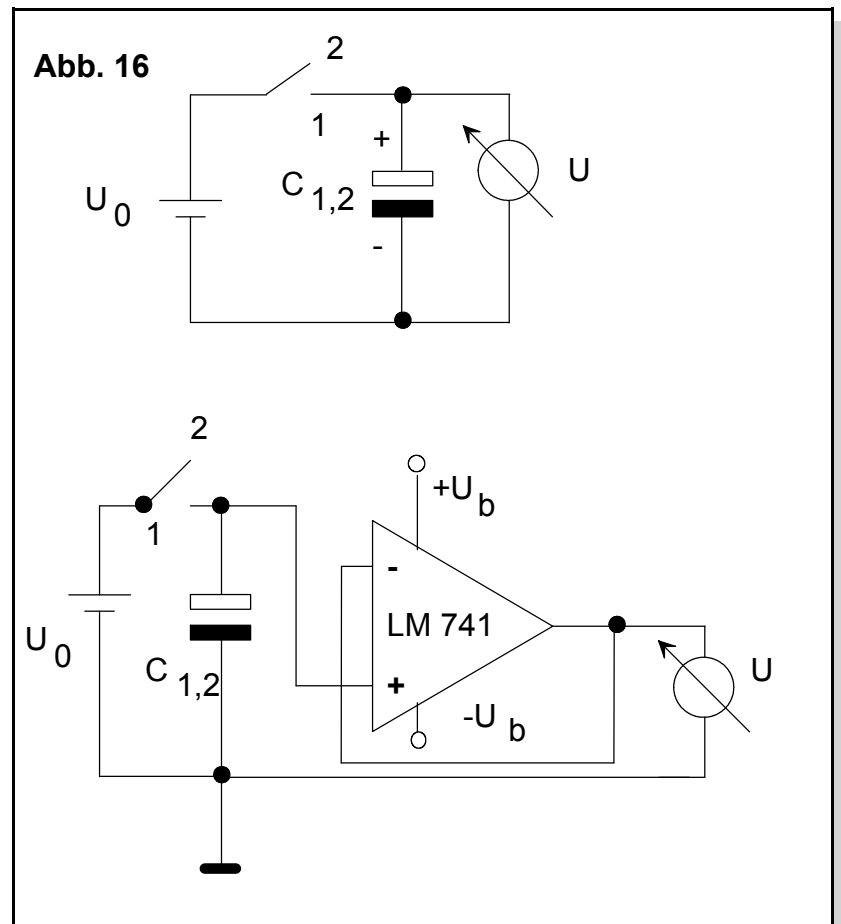
$C_2$ :  $2 \mu\text{F}$

$U_b$ :  $\pm 12\text{V}$

$U_{e1,2}$ :  $50\text{mV/V (Ampl.)}$

Weitere Geräte:

- Analogvoltmeter (mit nicht zu hohem Eingangswiderstand)
- evtl. (zweiter Versuch): Digitalvoltmeter




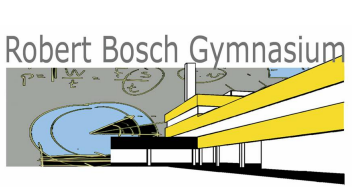
Ein Kondensator wird geladen (entsprechendes Umlegen des Schalters).

Setzt man die Kapazität des Kondensators als bekannt voraus (oder hat man sie in einem Vorversuch genau bestimmt), so kann man aus der Messung der Spannung, die an ihm liegt, wenn er geladen ist, die Ladung bestimmen, die sich auf ihm befindet:

$$Q = C \cdot U$$

Die auf dem Kondensator befindliche Ladung kann z. B. von einer Konduktorkugel stammen. Die oben gezeichneten Anordnungen können also als Ladungsmessgeräte benutzt werden. Messe die Spannung nach dem Laden des Kondensators an der Spannungsquelle zuerst mit der oberen, dann mit der unteren Schaltung. Benutze dazu zunächst ein Analog-, später auch ein Digitalvoltmeter.

Welche Vorteile hat demnach die untere Schaltung? Welche Funktion hat der Operationsverstärker, hier in seiner Schaltung als Elektrometerverstärker? Wie sind also Ladungsmessverstärker aufgebaut? Notiere und erkläre alle Ihre Beobachtungen.

|   |   |   |
|---|---|---|
|  | <p><i>Robert-Bosch-Gymnasium</i><br/> <b>Physik</b> (2-/4-stündig), NGO</p> |  |
| <p>Praktikum<br/> Versuch Nr.: 3.4</p>  | <p>Block 3</p>  | <p>4.4.2011<br/> Seite - 18 -</p>   |

### 3. Auswertung der Versuche, Hinweise zum Protokoll

Fasse im Protokoll zunächst in eigenen Worten kurz aber klar die theoretischen Grundlagen der Operationsverstärkertechnik zusammen. Benutze dazu auch die zusätzlich ausgegebenen Informationsschriften / Bücher.

Gib alle Schaltungen, Messtabellen, Schaubilder und Beobachtungen an.

Fülle die geforderten Meswertetabellen aus und bearbeite die bei den jeweiligen Versuchen gestellten Aufgaben. Bei der Fehlerbetrachtung kannst du dich auf eine Größtfehlerabschätzung bei den quantitativen Versuchen beschränken und Hinweise zu auftretenden Fehlerquellen geben.

Mache am Schluss auch Verbesserungsvorschläge zur Messung.