

12. Operationsverstärker

12.1 Definition, Schaltbild, Anschlüsse

Operationsverstärker sind Verstärker für elektrische Signale aller Art. Sie heissen so, weil sie früher für mathematische Operationen in Analogrechnern eingesetzt wurden (Addition, Integration usw.). Für die Bezeichnung verwendet man die Abkürzungen der englischen Form:

Operationsverstärker = **operational amplifier** = **Opamp** oder **OP-Amp**.

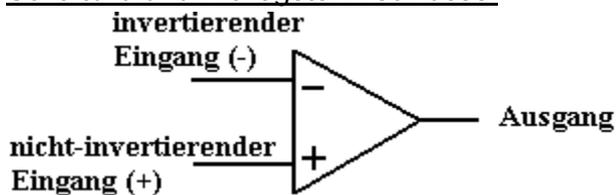
Operationsverstärker sind aus mehreren Transistorverstärkerstufen aufgebaut und als fertige Module in Form einer integrierten Schaltung (integrated circuit, **IC**) im Handel erhältlich. Sie werden sehr universell eingesetzt (Messwertverstärker, Tonverstärker, für Regelungsaufgaben).

Ein OP-Amp ist ein **Differenzverstärker**: Er hat **zwei Eingänge** und **verstärkt die Differenz seiner beiden Eingänge**.

Wenn also ein Eingangssignal unverändert bleibt (z.B. an Masse liegt), ist er bezüglich des Signals am andern Eingang ein normaler Verstärker.

Im Schaltbild werden meist nur die beiden Eingänge und der Ausgang gezeichnet:

Schaltbild und wichtigste Anschlüsse:



Handelsform als ICs



ACHTUNG: + und - bezeichnen die **Eingänge** und nicht die Anschlüsse der Speisespannung !!!

Es spielt keine Rolle, welcher oben und welcher unten ist.

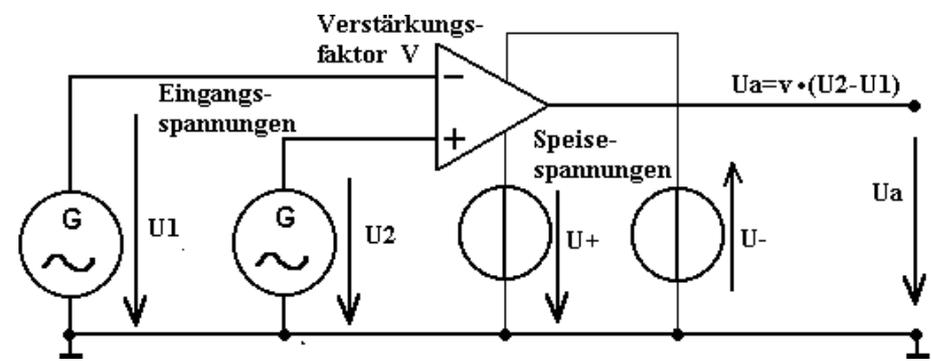
Die Anschlüsse für die Speisespannung werden meistens **nicht gezeichnet!**

12.2 Anschaltung eines OP-Amps

Opamps werden meist mit **symmetrischen Speisespannungen** betrieben, das heisst, es gibt zwei gleichgrosse Speisespannungen, eine mit positiver und eine mit negativer Spannung gegenüber einem **Bezugspotential (Masse)**.

Dies ist sinnvoll, damit ohne Weiteres auch symmetrische Signale verstärkt werden können, also normale Wechselspannungen mit positivem und negativem Ausschlag.

Allgemeiner (aber seltener) Betrieb eines Opamps, als Differenzverstärker:



Es können **zwei** Signalquellen angeschlossen werden. Das Ausgangssignal ist die Differenz der Eingangssignale, verstärkt mit dem Faktor **v**.

Die Speisespannung werden normalerweise **nicht** gezeichnet, der OP-Amp wird wie das Element eines Blockschaltbilds verwendet.

12.3 Eigenschaften und Betriebsarten eines OP-Amps

Meist wird zur Vereinfachung ein idealer OP-Amp angenommen. Merkwürdigste Eigenschaft ist vielleicht, dass der ideale Op-Amp ohne externe Bauelemente einen **Verstärkungsfaktor** von **unendlich** aufweisen soll. Einen Verstärkungsfaktor von unendlich gibt es natürlich nicht. Durch den inneren Aufbau der OP-Amps sind aber Faktoren bis mehrere 100'000 normal. Die realen Eigenschaften dürfen zugunsten der idealen vernachlässigt werden.

	idealer OP-Amp	realer OP-Amp
Verstärkungsfaktor	unendlich (siehe unten)	1'000'000
Eingangswiderstand	unendlich (der Verstärker belastet die Signalquelle nicht)	1 MΩ bis 1GΩ
Ausgangswiderstand (=Innenwiderstand des Verstärkers als Quelle)	null (eine Last beeinflusst die Ausgangsspannung des Verstärkers nicht)	10 Ohm
Frequenzbereich	Gleichstrom (DC) bis unendlich	0 (DC) bis ca. 100MHz

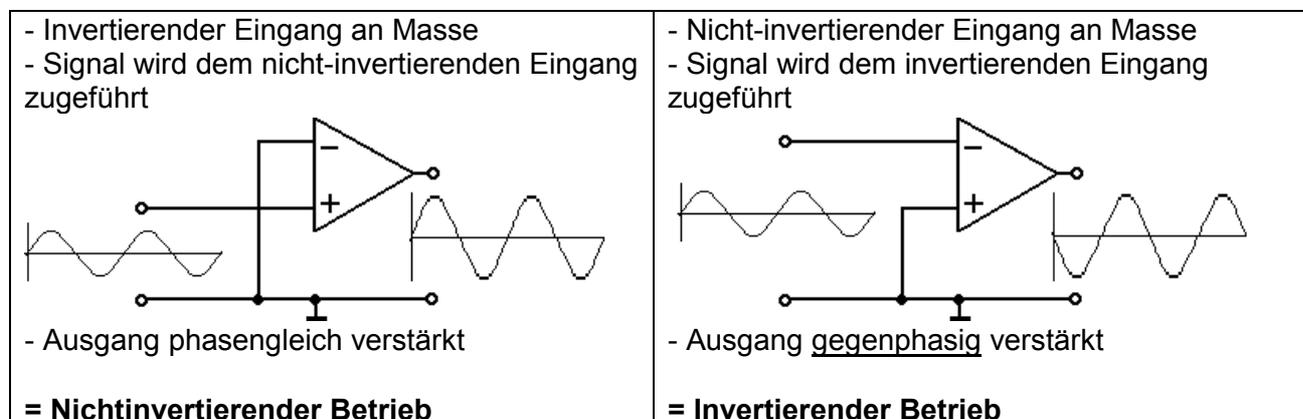
Solch extrem hohe Verstärkungen finden nur beim Komparator Anwendung (siehe 12.9). Denn beim kleinsten Eingangssignal würde ja die Ausgangsspannung bereits bis an die Grenze des Möglichen gehen (meist 2-3 Volt von den Versorgungsspannung weg, also zwischen -12 und +12 Volt bei +/-15 Volt Versorgungsspannung).

Deshalb wird die hohe Verstärkung durch eine sogenannte Gegenkopplung gebremst und begrenzt. Siehe Abschnitt 12.4.

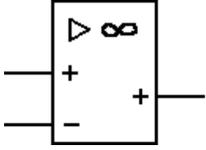
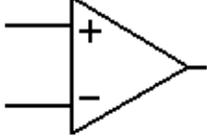
Allgemein werden die Eigenschaften des Operations-Verstärkers, vor allem der Verstärkungsfaktor und die Art der Rückkopplung je nach Anwendungsgebiet durch **äussere Bauelemente** eingestellt. Siehe Abschnitt 12.4.

Betriebsarten

Ausgehend vom Differenzbetrieb kann man sich die eine der beiden Signalquellen auf null gesetzt denken. Somit ist nur noch eine Signalquelle da, deren Differenz zu null nun verstärkt wird, also nur das Signal selber. Je nach dem, welcher Eingang auf null gesetzt wird (an Masse gelegt wird) und wo das Signal hereinkommt, ergeben sich die zwei grundsätzlichen Betriebsarten:



12.4 Rückkopplung / Gegenkopplung / Op-Amp-Funktionen

 <p>Op-Amp-Symbol nach IEC-Norm</p>	<p>Wie erwähnt hat der ideale Op-Amp ohne externe Elemente eine unendliche Verstärkung. Dies verdeutlicht auch noch das neuere Schaltsymbol nach IEC-Norm links mit dem Unendlichkeitszeichen.</p> <p>Wir werden jedoch weiterhin auch das "alte" Symbol rechts verwenden.</p>	 <p>"Altes" Symbol des Op-Amps</p>
--	--	---

Um die Eigenschaften des OP-Amps einzustellen, verwendet man die sogenannte **Rückkopplung**.

Allgemeine Definition:

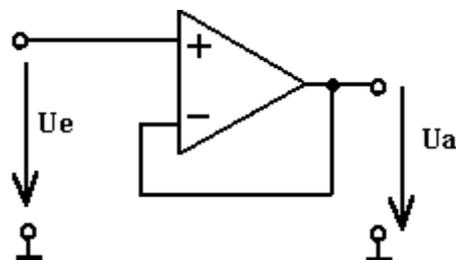
- Eine **Rückkopplung** ist ganz allgemein eine Wirkung von einem Ausgang auf einen Eingang zurück.
- Eine **positive** Rückkopplung heisst **Mitkopplung**. Das rückgekoppelte Signal wird dabei zum Eingangssignal **addiert**. Bekanntes Beispiel einer Mitkopplung ist eine Lautsprecher-Mikrofon-Rückkopplung (oder eben -Mitkopplung) die zu einer Schwingung, einem Pfeifton führt.
- Eine **negative Rückkopplung** heisst **Gegenkopplung**. Sie wirkt der Verstärkung entgegen. Das rückgekoppelte Signal wird vom Eingangssignal **subtrahiert**. Beim Op-Amp bewirkt dies eine Begrenzung des Verstärkungsfaktors.

Rückkopplung und Op-Amp-Funktion:

Die Rückkopplungsart legt die Funktion der Op-Amp-Schaltung fest: Es gilt folgendes:

Rückkopplungsart:	Eine Gegenkopplung ist eine Verbindung (z.B. ein Widerstand) vom Ausgang auf den invertierenden (-) Eingang .	Keine Rückkopplung (Keine Verbindung vom Ausg. auf den Eingang)	Eine Mitkopplung ist eine Verbindung (z.B. ein Widerstand) vom Ausgang auf den nicht-invertierenden (+) Eingang .
Funktion	Verstärker	Komparator	Schmitt-Trigger

12.5 Der Spannungsfolger



Verstärkungsformel:

$$\frac{U_a}{U_e} = 1$$

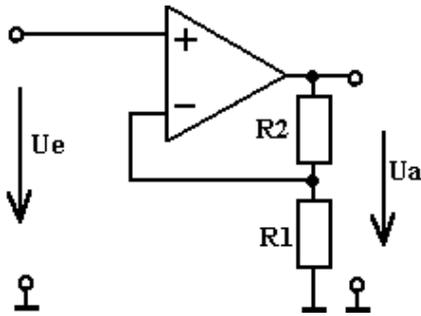
Hier sehen wir die einfachste Möglichkeit einer **Gegenkopplung**.

Das Ausgangssignal wird hier **vollständig** an den invertierenden Eingang zurückgeführt. Es wird gleichstark negativ wie das Eingangssignal U_e "verstärkt". Dies bedeutet, dass U_e **gar nicht verstärkt** wird, sondern 1:1 am Ausgang erscheint. Der **Verstärkungsfaktor ist 1**. Man nennt die Schaltung Spannungsfolger, weil U_a genau der Spannung U_e folgt.

Anwendung:

Impedanzwandler: Keine Veränderung der Signalstärke. hohe Eingangs-Impedanz (=Wechselstromwiderstand), tiefe Ausgangsimpedanz. => empfindlicher Eingang, starker Ausgang.

12.6 Nicht-invertierender Verstärker

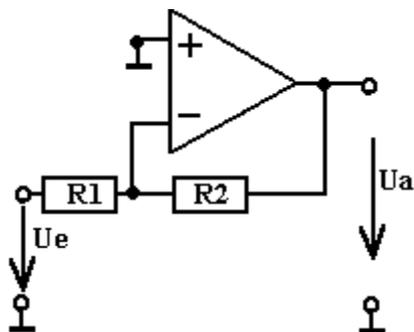


Im Gegensatz zum Spannungsfolger wird hier das Ausgangssignal **nur teilweise** über den Spannungsteiler aus R2 und R1 an den invertierenden Eingang zurückgeführt.

Der **Verstärkungsfaktor** ist dabei **mindestens 1**, nämlich:

$$\frac{U_a}{U_e} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

12.7 Invertierender Verstärker



Hier wird das Eingangssignal dem invertierenden Eingang zugeführt. Das Ausgangssignal wird damit an der t-Achse gespiegelt (invertiert).

Das Ausgangssignal wird wiederum **nur teilweise** über den Spannungsteiler aus R2 und R1 an den invertierenden Eingang zurückgeführt.

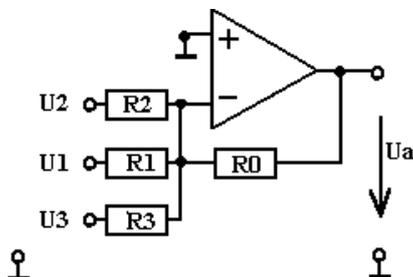
Der **Verstärkungsfaktor** ist dabei gerade **dem Verhältnis von R2 zu R1** und **invertiert**, also:

$$\frac{U_a}{U_e} = - \frac{R_2}{R_1}$$

Vorsicht wegen des Vorzeichens: Wenn man sagt, die **Verstärkung** werde bei einer Veränderung der Widerstände **grösser**, so kann es sein, dass er zwei verschiedene Dinge meint:

- der Wert wird **positiver** (weniger stark negativ). Dabei wird aber die Amplitude (Auslenkung) kleiner, also auch die Signalstärke.
- die Amplitude (also der Betrag des Ausdrucks) wird grösser. Dabei wird aber der mathematische Wert kleiner (negativer)!

12.8 Addierer

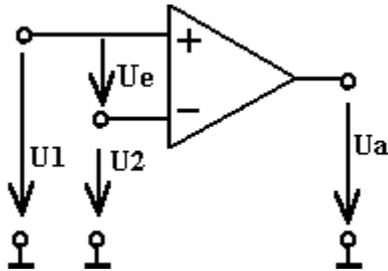


Am invertierenden Eingang können mehrere Signale angeschlossen werden.

Die einzelnen Spannungen werden verstärkt mit einem **Verstärkungsfaktor**, der sich aus dem entsprechenden Widerstand und R0 bildet.

$$U_a = - \left(U_1 \frac{R_0}{R_1} + U_2 \frac{R_0}{R_2} + U_3 \frac{R_0}{R_3} \right)$$

12.9 Komparator (Vergleicher)



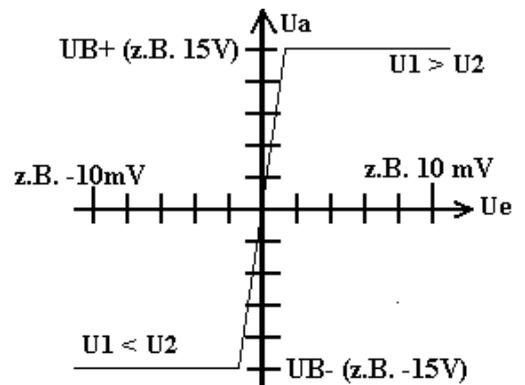
Ein Op-Amp **ohne Rückkopplung** kann als Komparator eingesetzt werden. Da die Verstärkung ohne Gegenkopplung extrem hoch ist, ist die Ausgangsspannung bei der kleinsten Abweichung der Eingangsspannung von null schon an den oberen oder unteren Anschlag, also auf die positive oder negative **Betriebsspannung (UB+ oder UB-, 115V oder -15V)**.

Verhalten des Komparators:

Er vergleicht die zwei Spannungen an den Eingängen.

- Wenn die Spannung am + Eingang grösser ist, so geht Ua auf UB+
- Wenn die Spannung am - Eingang grösser ist, so geht Ua auf UB-

Ein- und Ausschaltpegel sind am gleichen Ort (bei $U1=U2$ oder $Ue=0$)



Anwendung: Flash-Wandler für die Analog-Digital-Wandlung von Signalen (Kap. 13, Schluss)

12.10 Schmitt-Trigger

OP-AMPS können auch eine **positive** Rückkopplung, also eine **Mitkopplung** haben. Dies ist eine Verbindung vom Ausgang zum **nichtinvertierenden (+)** Eingang.

Ein OP-AMP mit **positiver Rückkopplung** wird zu einem **Schmitt-Trigger**.

Das Verhalten ähnelt einem Komparator, aber der Ein- und Ausschaltpegel fallen nicht mehr zusammen.

Ein Komparator kann **kaum saubere Schaltvorgänge** ausführen, da er im Grenzbereich ständig auf der Kippe ist und aufgrund kleinster Störungen des Eingangssignals vom einen in den andern Zustand kippen kann.

Was muss man also tun, um z.B. ein langsam steigendes oder sinkendes Steuersignal in einen eindeutigen, einigermassen stabilen Schaltvorgang "umzuwandeln"?

Lösung: Der Schmitt-Trigger

Der Eingang **Ue kann sich langsam** und kontinuierlich ändern, erst wenn ein bestimmter Wert überschritten oder unterschritten wird, wechselt der Schaltzustand am Ausgang Ua schlagartig.

Dies entspricht genau dem Schaltverhalten der einfachen **Zweipunktregler**, z.B eines **Kühlschrank-Thermostaten** oder auch des **Relais**!

Eigenschaften:

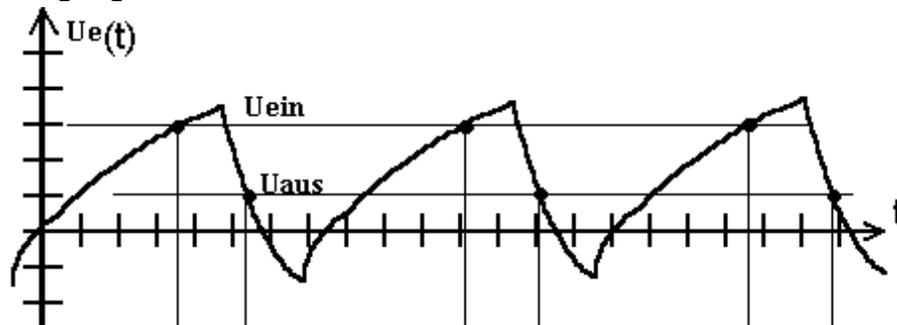
- Die Ausschaltswelle liegt **unter** der Einschaltswelle. Somit entsteht eine **Schalthyterese**.
- Die **Einschalt- und die Ausschaltswelle** hängen von den Widerständen ab.

Anwendungen:

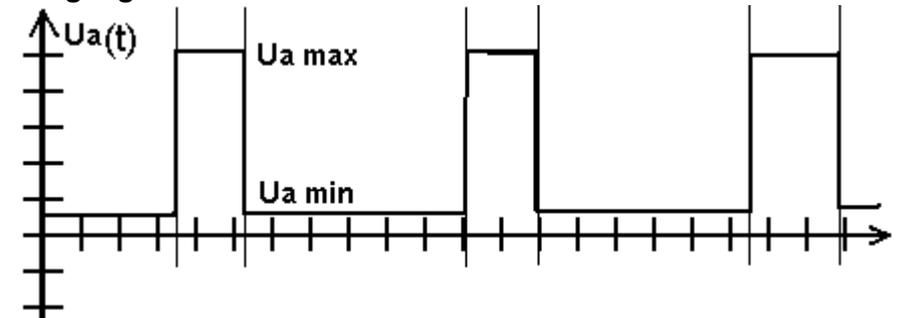
- Als Schwellwertschalter (schaltet bei bestimmtem Schwellenwert von U_e), z.B. Thermostat
- Als **Wandler** von beliebigen (ev. periodischen) Signalen in Rechtecksignale

Beispiel:

Eingang:

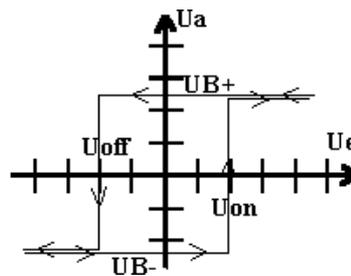
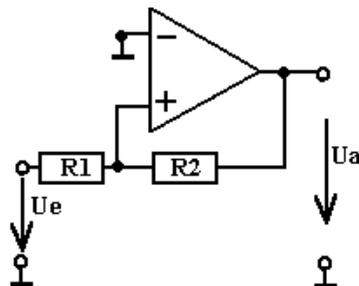


Ausgang:



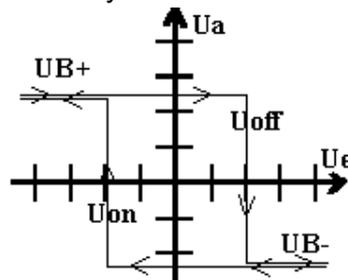
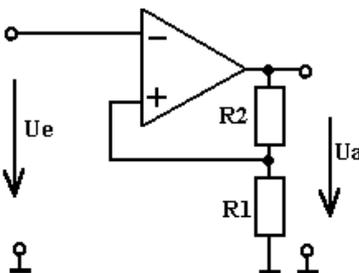
Durch die Rückkopplung auf den nichtinvertierenden Eingang (=Mitkopplung) wird das Eingangssignal durch das Ausgangssignal in die gleiche Richtung "mitgerissen", in die es schon unterwegs ist. Der jeweilige Ausgangszustand wird also noch verstärkt, der angestrebte Zustand wird quasi verriegelt. Für das Zurückkippen des Zustandes benötigt man eine stärker entgegengesetzte Eingangsspannung.

Nicht-invertierender Schmitt-Trigger mit Schalthysterese:



$U_{on} > U_{off}$

Invertierender Schmitt-Trigger mit Schalthysterese:

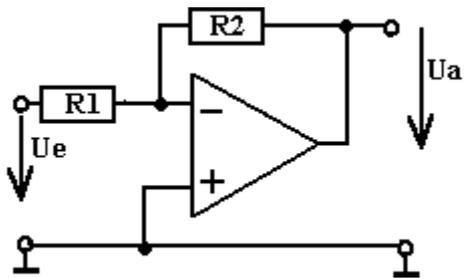


$U_{on} < U_{off}$

12.11 Übungen zu Op-Amps (Gegenkopplung)

1.

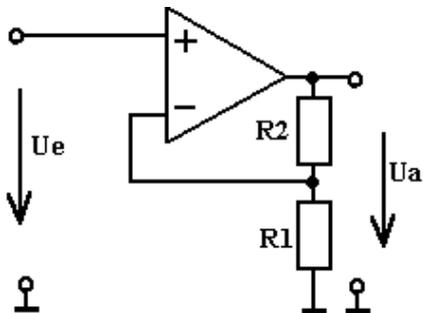
Was ist das für eine Schaltung?



2.

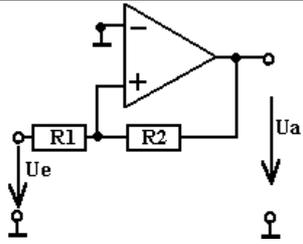
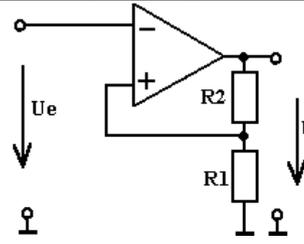
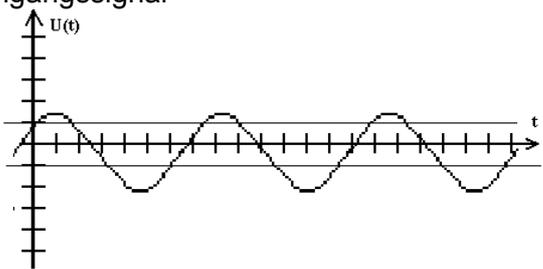
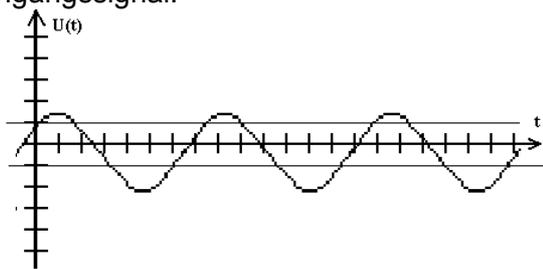
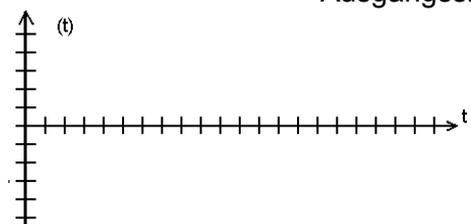
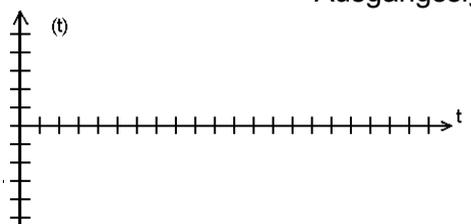
Dieser Verstärker soll eine Verstärkung von Faktor 8 haben. R2 sei 4,7kOhm.

- Wie heisst der Verstärker?
- Wie lautet die Verstärkungsformel?
- Wie gross muss R1 sein?



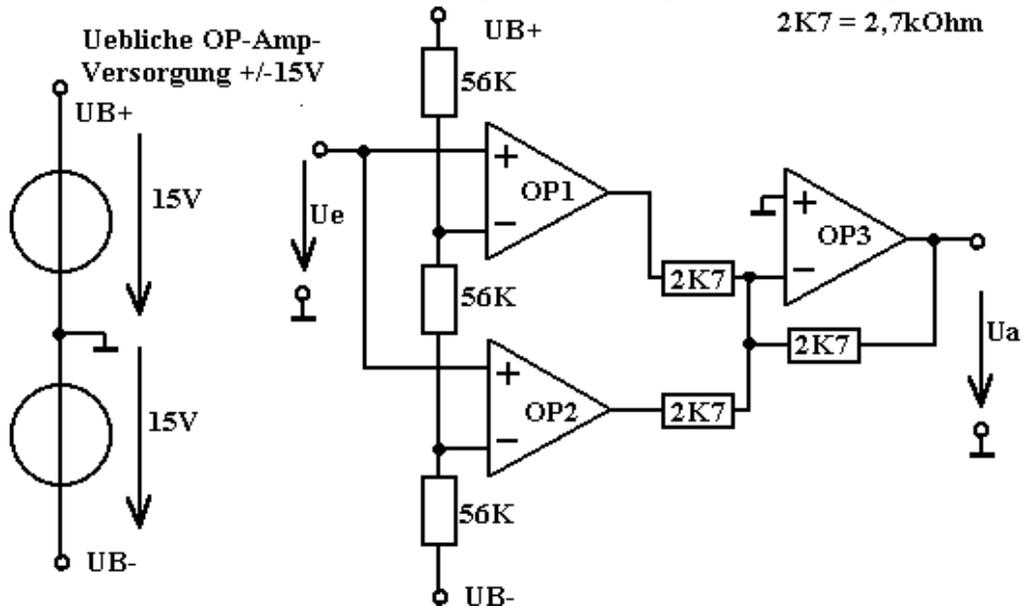
12.11 Übungen zu Op-Amps (Mitkopplung)

1. Was machen die beiden Schaltungen mit dem Eingangssignal?

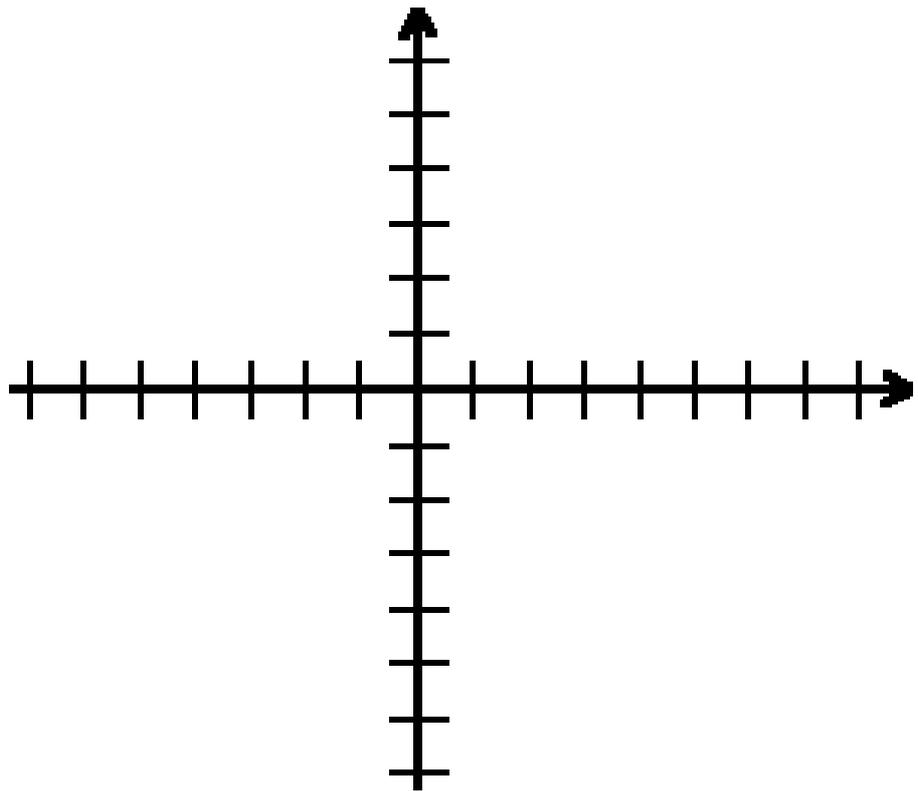
	
<p>Bezeichnung:</p>	<p>Bezeichnung:</p>
<p>Eingangssignal</p> 	<p>Eingangssignal:</p> 
<p>Ausgangssignal:</p> 	<p>Ausgangssignal:</p> 
<p>Besonderheit:</p>	<p>Besonderheit:</p>

2.

Zeichnen Sie ein exaktes U_a - U_e -Diagramm der folgenden Schaltung:

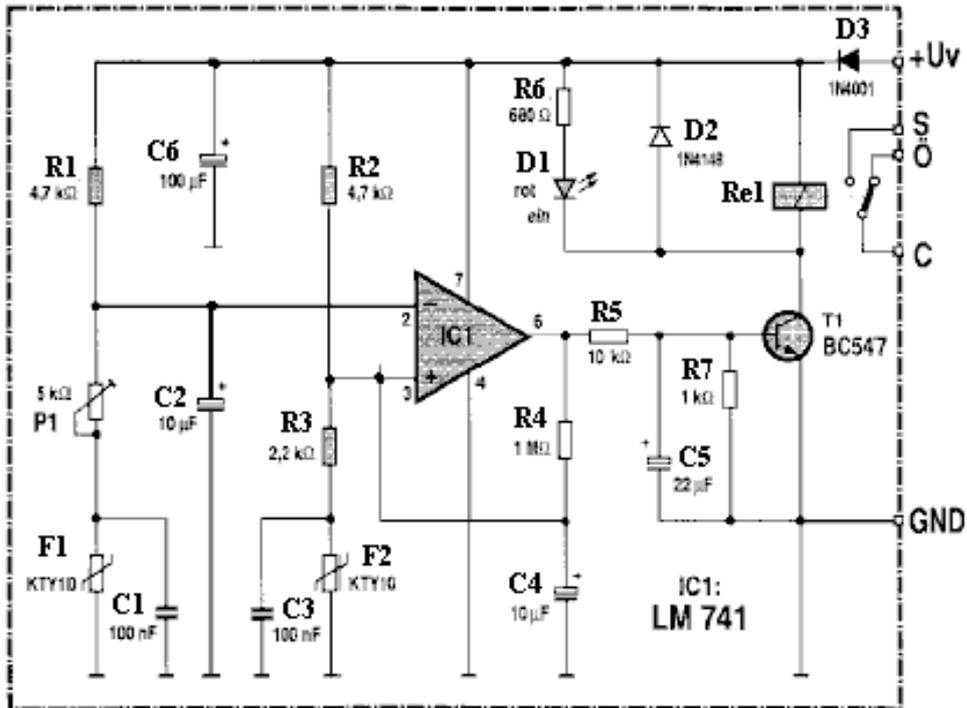


Beschreibung der Schaltung:



Anwendung Operationsverstärker

Beschreiben Sie die Wirkungsweise der folgenden Schaltung:



Speisung OpAmp?	R5 und R7
Rückkopplung?	T1
Schaltungstyp?	Relais
Eingänge?	D1 / R6
R1, P1 und F1	D2
P1	
R2, R3 und F2	
Kondensatoren	

Funktion der Schaltung:

Verwendung als

- **Temperaturdifferenzschaltung (weitere Erklärungen)**
- **ev. Rechteckgenerator = Schmitt-Trigger mit R-C-Glied**