

Grundlagen der Operationsverstärker

1 - Einführung:

2 - Kurzbeschreibung der Funktionsweise eines OPV's:

3 - Allgemeine Technische Daten:

- Absolute Grenzwerte
- Versorgungsspannung
- Maximale Verlustleistung
- Eingangsspannungen und -differenzen
- Einlöten
- Ausgangsseitiger Kurzschluß

4 - Technische Details des Operationsverstärkers:

- Eingangswiderstand
- Offset
- Eingangs Nullstrom
- Eingangswiderstand
- Eingangskapazität
- Gleichtaktunterdrückung
- Leerlaufverstärkung
- Versorgungsspannungsunterdrückung
- Ausgangsspannungshub
- Ausgangswiderstand
- Kurzschlußstrom
- Versorgungsstrom
- Leistungsaufnahme
- Einschwingverhalten
- Anstiegsgeschwindigkeit

5 - Einfache Grundsaltungen des Operationsverstärkers:

- Impedanzwandler
- Invertierender Verstärker
- Nichtinvertierender Verstärker
- Strom-Spannungswandler
- Spannungs-Stromwandler
- Spannungskomparator mit und ohne Hysterese
- Astabiler Multivibrator
- Bistabiler Multivibrator
- Differenzverstärker
- Summierverstärker
- Differenzierer (Hochpaß)
- Integrierer (Tiefpaß)

1-Einführung

Die Einsatzgebiete eines Operationsverstärkers kann man schon anhand seines Namens erahnen. Er wird immer dort eingesetzt, wo mit einem einfachen Bauteil Signale verstärkt werden sollen. Doch ein Operationsverstärker kann auch Rechenaufgaben ausführen, Signale oder Pegel vergleichen, Meßgrößen umformen oder Meßsignale wie z.B. Rechteck-, Dreieck- oder Sinussignale generieren. Um die Sache zu vereinfachen, sind alle Beispiele, sofern nicht anders angegeben auf den Standard-Typ $\mu A741C$ bezogen.

Zunächst beschäftigen wir uns mit dem Datenblatt des $\mu A741$.

Das Datenblatt ist wichtig, da es sonst zu unerklärlichen Erscheinungen kommen kann, die auf die Bauteilstreuungen und auf einige Hersteller spezifischen Details zurückzuführen sind. Dabei stellt man schnell fest, daß der Operationsverstärker alles andere als perfekt ist. Doch "Fehler erkannt" bedeutet meistens auch "Fehler gebannt".

Ein Datenblatt umfaßt unzählige Seiten mit Anschlußbelegungen, Kennlinien, Spezifikationen und Schaltungsbeispielen. Die meisten beginnen mit einer allgemeinen Kurzbeschreibung, in der die Hersteller ihre Ware anpreisen. Die Kurzbeschreibung ist also mit Vorsicht zu genießen.

Die hervorgehobenen Schlagwörter (Highlights) heben die wesentlichen Vorteile noch einmal hervor: Kurzschlußfest, keine Frequenzkompensation erforderlich, Offset-Abgleichmöglichkeit, große Eingangsspannungsbereiche, niedrige Leistungsaufnahme und kein Latch-up-Effekt (vergleichbar mit Systemabsturz, nur durch kurzes Abschalten der Versorgungsspannung ist normales Arbeiten wieder möglich). Das selbe gilt übrigens auch für die meisten gebräuchlichen Operationsverstärker.

Das Wichtigste ist die genaue Typenbezeichnung, die noch zusätzliche Buchstaben enthalten kann. Diese charakterisieren spezielle Eigenschaften und die Bauform einer speziellen Version des Bauteils. Für den $\mu A/LM 741$ gibt es über zehn unterschiedliche Gehäuseversionen.

Der Betriebstemperaturbereich wird grundsätzlich in drei Kategorien aufgeteilt:

Consumer - Bereich	0...+70 °C	Weit verbreitet und Preiswert für normale Schaltungen.
Erweiterter industrieller - Bereich	-20...+70 °C	Wird in Geräten eingesetzt, die außerhalb von Gebäuden funktionieren sollen.
Voll militärisch	-55...+125 °C	Gilt auch für Raumfahrt Bedingungen und findet besonders in kritischen Bereichen wie z.B. in der Fahrzeugelektronik Anwendung

Meistens ist nur ein einziger Typ erhältlich, nämlich der billigste. Da Hobbygeräte normalerweise nicht in den Weltraum geschossen werden, sollte uns das nicht weiter beunruhigen. Die Lagertemperatur ist normalerweise irrelevant, außer jemand möchte seine Bauteile im Backofen aufbewahren. Lagertemperaturen außerhalb -65 °C und +125 °C grenzen schon an mutwillige Zerstörung.

2-Kurzbeschreibung der Funktionsweise eines OPV's

Der Operationsverstärker besitzt zwei Eingänge, von denen einer invertierend wirkt. Die verstärkte Differenz dieser Eingänge wird am Ausgang in Form einer Spannung ausgegeben. Ein idealer Operationsverstärker hat eine unendlich hohe Verstärkung. Das soll bei dem neuen Schaltzeichen das Unendlichsymbol ausdrücken. In der Praxis haben die OPV's einen Verstärkungsfaktor von "nur" einigen hundert tausend. Mit so hohen Empfindlichkeiten kann man aber keine vernünftige Schaltung aufbauen. Das elektrische Feld, das beim Fingerschnipsen entsteht, würde reichen um den Ausgang zu beeinflussen. Der Operationsverstärker muß also "gezähmt" werden. Die einzige Möglichkeit dazu ist eine Rückkopplung. In den allen Schaltungsbeispielen gehe ich immer davon aus, daß der Operationsverstärker eine symmetrische Versorgungsspannung von ± 15 V bekommt.

3-Allgemeine Technische Daten

Praktisch bei allen Arten von Bauelementen vorhanden, hier bezogen auf $\mu A741$.

Die meisten Angaben sind wegen Fertigungsstreuungen in Min, Max und Typisch (Typical) angegeben. Die typischen Werte beziehen sich auf einen hohen Prozentsatz aller hergestellten Bauteilen. Je nach Hersteller schwankt dieser statistische Wert, als Richtwert kann man jedoch von 90-95% ausgehen. Der Hersteller garantiert, daß die ausgelieferten Bauteile die im Datenblatt angegebenen minimalen und maximalen Grenzwerte einhalten. Wird die Serie geändert, so erhält das Bauteil einen zusätzlichen Buchstaben in seiner Typenbezeichnung und keiner kann meckern. Deshalb Vorsicht bei teuren Bauelementen, deren Typenbezeichnung leicht von Datenblatt abweicht!

Absolute Grenzwerte:

Die absoluten Grenzwerte sollten auf keinen Fall überschritten werden, da das Bauteil zerstört beziehungsweise dauerhaft beschädigt werden kann, oder nur die im Datenblatt angegebenen Eigenschaften nicht mehr gewährleistet sind. Es muß auch gar nichts passieren, da Fertigungstoleranzen, sofern nicht ausdrücklich anders angegeben, eingeplant sind. Wenn es dabei trotzdem, möglicherweise auch später im Normalbetrieb "knallt", braucht man sich weder zu wundern, noch sein Geld zurückverlangen.

Versorgungsspannung:

Als Versorgungsspannung sind maximal ± 18 V angegeben. Die meisten Schaltungen werden mit ± 15 V betrieben, also auf der sicheren Seite. Die Versorgungsspannung sollte für die meisten Anwendungen symmetrisch sein. Falls negative Ausgangsspannungen erreicht werden müssen, ist dies auch zwingend erforderlich. Bei einigen seltenen Fällen, besonders interessant bei Batteriebetrieb, kommt man auch mit einer asymmetrischen Spannungsversorgung aus. Für die meisten Anwendungen verwendet man am besten die bewährten Festspannungsregler (LM) 7815/7915. Sie sind stark genug für fast alle größeren OPV - Anwendungen.

Maximale Verlustleistung:

Die maximale Verlustleistung (Power Dissipation) ist abhängig von der Gehäuseversion und der maximal zulässigen Temperatur. Ein Metallgehäuse kann die Verlustwärme besser an die Umgebung abgeben als ein einfaches, aber deutlich billigeres Plastikgehäuse. Das einfache 8-Pin Plastikgehäuse verkraftet 310 mW, das 14polige Dual-in-line Gehäuse verträgt etwa das Doppelte. Leider beziehen sich alle Angaben auf max. 70°C Umgebungstemperatur. Theoretisch kann

verträgt etwa das Doppelte. Leider beziehen sich die Angaben auf max. 70 °C Umgebungstemperatur. Theoretisch kann man bei viel niedrigeren Umgebungstemperaturen, vielleicht zusätzlich sogar mit Kühlkörper höhere Werte verwenden, aber der Hersteller gibt leider keinen Hinweis darauf.

Eingangsspannungen und -differenzen:

Eingangsspannungen und deren Unterschiede dürfen sich im Bereich -15...+15 V bewegen. Sie dürfen die Versorgungsspannung niemals überschreiten.

Einlöten:

Beim Einlöten (Soldering) darf man die Anschlüsse eine Minute lang auf 300°C erwärmen. Das hört sich nach mehr an als es ist, also bitte nicht als Einladung zum Grillfest verstehen. Lötet man die Anschlüsse nicht gleichzeitig, sondern nacheinander ein, gilt dieser Wert nur nach vollständigen Abkühlen des gesamten Bauteils. Ein einminütiger, pausenloser Lötvorgang aller Anschlüsse kann schon kritisch werden. Hobby- oder Versuchsschaltungen sollten auf jeden Fall mit Fassungen bestückt werden, um einen "geschossenen" IC schnell und bequem wechseln zu können oder gegen einen anderen (stärkeren) Typ auszutauschen.

Ausgangsseitiger Kurzschluß:

Ein Ausgangsseitiger Kurzschluß (Output Short Circuit Duration) darf laut Hersteller unbegrenzt dauern, solange alle Randbedingungen erfüllt bleiben. Ein Kurzschluß darf gegen Masse oder eine der beiden Versorgungsspannungen bestehen. Natürlich gibt es auch hier eine wesentliche Einschränkung: Die Gehäusetemperatur darf 125°C, und deswegen die Umgebungstemperatur 75°C nicht überschreiten. Da ein Kurzschluß nicht zu den normalen Anwendungsfällen gehört, sollte man ihn auf alle Fälle vermeiden.

4-Technische Details des Operationsverstärkers

Eingangswiderstand:

Der Eingangswiderstand ist mit Typ. 2 MΩ angegeben. Wenn man Pech hat, erwischt man ein Bauteil mit nur 300 kΩ. Ein idealer Operationsverstärker besitzt bekanntlich einen unendlich hohen Eingangswiderstand. Der Toleranzbereich ist also unvorteilhaft groß.

Offset:

Ähnliches gilt für den Offset, der im Idealfall "Null" betragen sollte. Ein typischer realer Wert ist 2.0 mV, darf jedoch auch mal das dreifache betragen. Er beschreibt die Ausgangsspannung, die bei miteinander verbundenen und auf Masse gelegten Eingängen entsteht. Dieser Offset macht sich besonders bei geringen Signalen störend bemerkbar, da bei Schaltungen mit hohen Verstärkungsfaktoren diese Offsetspannungen sogar bis in den Voltbereich mit verstärkt werden. Zum Glück kann man die meisten Operationsverstärker mit einem Trimmer an den zusätzlichen Anschlüssen abgleichen. Bei dem achtpoligen Gehäuse sind das die Anschlüsse 1 und 5, die mit einem 10 kΩ-Trimmer verbunden werden.

Eingangs Nullstrom (Input Bias Current):

Bei einem in Ruhelage ausgesteuerten Ausgang können an den beiden Eingängen unterschiedliche Ströme fließen. Das bedeutet in der Praxis, daß bei Signalquellen mit hohem Innenwiderstand die Spannung verfälscht wird, da die Quellen unterschiedlich stark belastet werden und unterschiedliche Spannungen ausblenden.

unterschiedlich stark belastet werden und unterschiedliche Spannungen produzieren.

Eingangswiderstand (Input Resistance):

Das ist der Widerstand, den man gegenüber Masse an den Eingängen messen kann, vorausgesetzt, der jeweils andere Eingang liegt auf Masse. Nachteilig fallen hierbei wieder einmal Quellen mit hohem Innenwiderstand auf, die durch den Eingangswiderstand teilweise stark belastet werden.

Eingangskapazität (Input Capacitance):

Unter den gleichen Meßbedingungen wie bei den Eingangswiderständen, kann man sie als parallel zu den Eingangswiderständen liegenden Kondensatoren betrachten. Störend wirken sie sich besonders bei hohen Frequenzen aus, da sich durch die Kapazitäten zusätzliche parallele Eingangswiderstände entstehen, die Frequenzabhängig sind.

Gleichtaktunterdrückung:

Steuert man beide Eingänge mit ein und dem selben Signal an, so würde sich der Ausgang theoretisch nicht verändern. In der Praxis ändert sich die Ausgangsspannung wegen den starken Symmetrieunterschieden durch Fertigungstoleranzen. Die Gleichtaktunterdrückung ist in dB angegeben und beschreibt das Verhältnis zwischen Eingangsspannungsänderungen und der Änderung der Offsetspannung. Die im Datenblatt angegebenen 90dB entsprechen einem Verhältnis von 1: 30.000. Dieser Wert wird in der Praxis leider nicht erreicht. Die Gleichtaktunterdrückung macht sich besonders bei auf beide Eingänge gleichzeitig einwirkenden Störsignalen bemerkbar, die z.B. bei Brückenschaltungen, das Ausgangssignal theoretisch nicht beeinflussen können, da sie keine Differenz zwischen den Eingängen erzeugen. Dadurch ergeben sich manchmal auch ziemlich große Meßfehler.

Leerlaufverstärkung (Large Signal Voltage Gain):

Sie gibt die Verstärkung an, die man ohne Rückkopplung erhält. Sie ist bei einem Lastwiderstand von 2 k Ω und einem Ausgangsspannungshub von ± 10 V definiert. In der Praxis erreicht man den angegebenen Wert von typisch 200.000 nie und liegt meistens um den Faktor 10 darunter.

Versorgungsspannungsunterdrückung (Supply Voltage Rejection Ratio):

Durch Änderung der Versorgungsspannung ändert sich auch die Offsetspannung. Bei einem Volt Versorgungsspannungsänderung ändert sich der Offset um 0,3 μ V. Bei einer 300fachen Verstärkung erhöht sich der Fehler jedoch schon um 0,1 mV.

Ausgangsspannungshub (Output Voltage Swing):

Der Operationsverstärker kann niemals die volle Eingangsspannung an seinem Ausgang erzeugen. In jedem Fall wird die maximale Ausgangsspannung bei einer Eingangsspannung von ± 15 V deutlich über ± 10 V liegen. Bei normalen Belastungen etwa ± 13 V und im Idealfall sogar nur 1 V unterhalb der Versorgungsspannung.

Ausgangswiderstand (Output Resistance):

Dabei handelt es sich um den wirksamen Wechselstrom-Widerstand des Ausganges, gilt nur für geringe und offsetfreie Ausgangssignale. Für die Praxis nur in Grenzfällen relevant.

Kurzschlußstrom (Output Short Circuit Current):

Höhe der Stromstärke bei einem Kurzschluß. Randbedingungen beachten (s. ausgangsseitiger Kurzschluß).

Versorgungsstrom (Supply Current):

Stromaufnahme bei unbelasteten Operationsverstärker. Mit Typ. 1,7 mA ist dieser so gering, daß man ihn nur bei Batteriegeräten zu spüren bekommt.

Leistungsaufnahme (Power Consumption):

Diese Verlustleistung, natürlich am unbelasteten Operationsverstärker, entsteht durch den Versorgungsstrom und ist abhängig von der Betriebsspannung.

Einschwingverhalten (Transient Response):

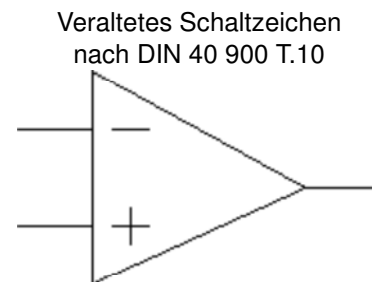
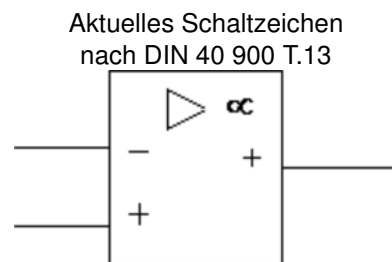
Ein realer Operationsverstärker benötigt eine gewisse Reaktionszeit und verschleift ein sprungförmig angestiegenes Eingangssignal; er gilt für eine Last von 2 k Ω ||100 pF und der Verstärkung "Eins" (Unity Gain).

Anstiegsgeschwindigkeit (Slew Rate):

Ein reales Bauteil weist Kapazitäten und ungewollte Widerstände auf. Teilweise sind auch welche absichtlich eingebaut worden, um unkontrolliertes Schwingen zu vermeiden. Dadurch kann der Ausgang nicht beliebig schnell ansteigen. Das liegt daran, daß der Operationsverstärker aus mehreren Verstärkerstufen aufgebaut ist, die jede für sich Verzögerungen und Kapazitäten beisteuert. Die Angaben beziehen sich auf einen Lastwiderstand von minimal 2 k Ω . Soll sich die Ausgangsspannung um 10 V ändern, so braucht der Operationsverstärker eine Zeit von typisch 5 μ s. Kritisch wird es also bei hohen Frequenzen, da das Ausgangssignal stark gedämpft wird.

5-Einfache Grundschaltungen des Operationsverstärkers

In letzter Zeit haben sich die Schaltzeichen für Schaltpläne dramatisch geändert. Ich persönlich halte die meisten alten Schaltzeichen für übersichtlicher, weil man schon "vom Weitem" die Funktion eines Teils sehen kann und nicht die Bezeichnung oder Eigenschaft eines Kästchens ablesen braucht. Das neue Zeichen für den Operationsverstärker kann man nicht mehr auf dem flüchtigen ersten Blick von den Logikgattern unterscheiden. Deswegen benutze ich immer noch die alten Schaltzeichen, sofern ich nicht, wie in der Industrie üblich, dazu verpflichtet bin die neuen zu nutzen.



Der Impedanzwandler:

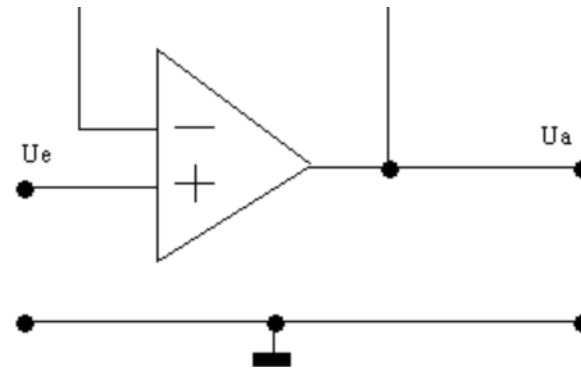
Diese Schaltung, auch Spannungsfolger genannt, hat einen

Diese Schaltung, auch Spannungsfollower genannt, hat einen Verstärkungsfaktor von eins. Sie ist die Grundlage für die meisten OPV-Schaltungen. Machen wir, um die Funktionsweise zu verdeutlichen, ein Gedankenexperiment ausgehend vom idealen Operationsverstärker:

Gehen wir davon aus, daß sämtliche Spannungen, außer der Versorgungsspannung, auf Massepotential liegen. Am Eingang gibt es keine Differenz und die Schaltung tut überhaupt nichts. Erhöhen wir jetzt die Eingangsspannung, so gibt es eine Differenz zwischen den beiden Eingängen. Da der nichtinvertierende Eingang (+) nun "positiver" als der invertierende Eingang (-) ist, erscheint eine positive Spannung am Ausgang. Die Ausgangsspannung ist mit dem invertierenden Eingang verbunden. Ist die Ausgangsspannung zu groß geworden, so ist nun der invertierende Eingang "positiver" als der nichtinvertierende. Dadurch wird die Ausgangsspannung negativ und der Vorgang beginnt von vorne.

Diese Schaltung wäre nicht zu gebrauchen, da als Ausgangssignal eine rechteckförmige Wechselspannung mit extrem hoher Frequenz entsteht, würde der Operationsverstärker nicht einige "unerwünschte Nachteile" haben. Das Ausgangssignal kann sich nicht so schnell ändern wegen der Anstiegsgeschwindigkeit und die Schaltung pendelt sich auf einen Mittelwert ein, der (fast) genau der Eingangsspannung entspricht. Alle gebräuchlichen Formeln und Modelle gelten nur für den eingeschwungenen Zustand.

Der Operationsverstärker sorgt also dafür, daß seine Eingänge das gleiche Potential haben. Dieses Phänomen nennt man "Virtueller Nullpunkt", da beide Eingänge exakt das gleiche Potential haben, sofern der OPV nicht überfordert wird.



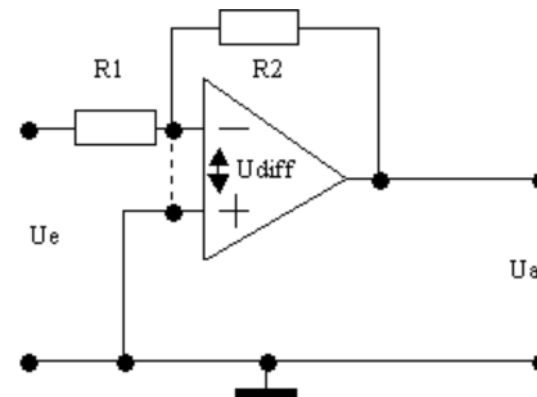
Der Impedanzwandler kommt zu seinem Namen, da diese Schaltung einen sehr hochohmigen Eingangswiderstand besitzt und einen vernachlässigbaren Ausgangswiderstand hat. Dadurch kann man einen niederohmigen Verbraucher an eine hochohmige Signalquelle anschließen, ohne daß die Quelle "zusammenbricht". Aus den Angaben des Datenblatts kann man entnehmen, daß diese Schaltung einen Eingangswiderstand von typisch 400 MΩ und einen Ausgangswiderstand von deutlich unter 1 Ω besitzt.

Invertierender Verstärker:

Ein Verstärker wäre kein Verstärker, wenn er nicht auch verstärken könnte. Die einfachste Variante ist der invertierende Verstärker. Er verstärkt Spannungen und ändert deren Vorzeichen. Wie bei dem Impedanzwandler versucht der OPV seine Eingänge auf dem gleichen Potential zu halten. Dadurch entsteht wieder der unter "Impedanzwandler" angesprochene "virtuelle Nullpunkt" ($U_{diff}=0V$). Stellen wir uns also für die Berechnung und Dimensionierung der Schaltung die Eingänge als miteinander verbunden vor (gestrichelte Linie).

R1 hängt also zwischen U_e und der virtuellen Masse. Zwangsweise fließt auch ein Strom durch diesen Widerstand:

$$I_{R1} = \frac{U_{R1}}{R1} = \frac{U_e}{R1}$$



Ein OPV hat einen extrem hohen Eingangswiderstand, so daß der Strom, der durch die Eingänge fließt vernachlässigbar

klein ist. Also muß der gesamte Strom durch R2 fließen, damit die Eingänge ausgeglichen sind (Kirchhoffsche Regel). Die Ausgangsspannung des Verstärkers kann man jetzt einfach berechnen, da R2 zwischen der virtuellen Masse und U_a liegt und der Widerstand samt zugehörigen Strom bekannt sind. Daraus folgt, sofern man die Stromrichtung beachtet: $U_a = R2 \cdot IR2 = R2 \cdot (-IR1)$

Setzt man die beiden Formeln zusammen und stellt sie ein wenig um, spart man sich nach dem Kürzen die Berechnung des Stroms:

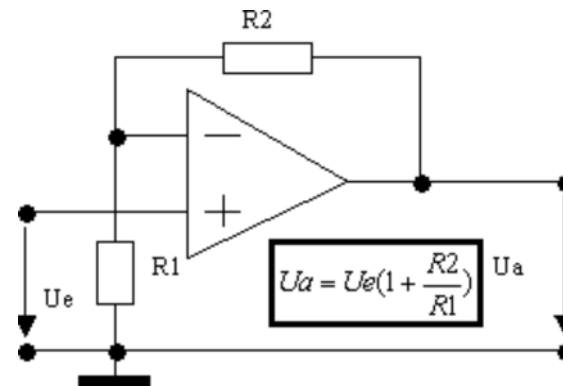
$$U_a = -U_e \cdot \frac{R2}{R1}$$

Die negative Verstärkung kann man sich daran verdeutlichen, daß der Ausgang des OPV's negativ werden muß, um den invertierenden Eingang "auf Masse zu ziehen".

Nichtinvertierender Verstärker:

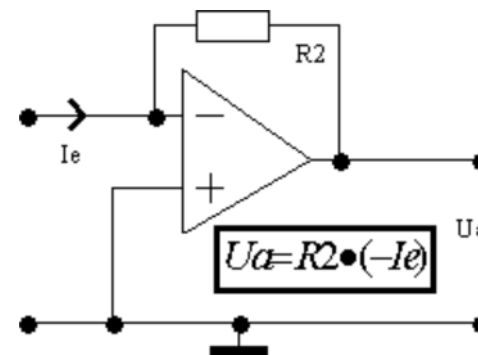
Bei dieser Verstärkerschaltung wird das Signal ausnahmsweise einmal nicht invertiert.

Das Ausgangssignal wird durch einen Spannungsteiler, der als unbelastet angenommen werden kann, auf den invertierenden Eingang zurück gekoppelt. Die Funktionsweise ist identisch mit dem Impedanzwandler, nur mit dem Unterschied, daß die zurück gekoppelte Spannung geteilt, und die Ausgangsspannung deswegen verstärkt wird. Der Verstärkungsfaktor wird durch das Verhältnis der beiden Widerstände bestimmt.



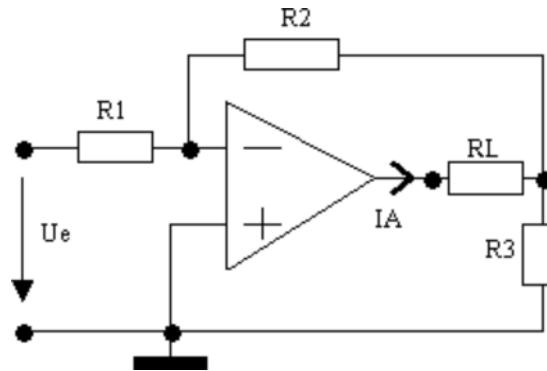
Strom-Spannungswandler:

Diese Schaltung beruht auf dem selben Prinzip wie der invertierende Verstärker, nur spart man sich den Widerstand R1. Der Operationsverstärker regelt seinen Ausgang so, daß der Strom vollständig über R2 abfließen kann. Nur so entsteht kein Potentialunterschied zwischen den beiden Eingängen. Für die Berechnung kann man ein Zwischenergebnis des Invertierenden Verstärkers wiederverwerten. $IR1$ wird in I_e umgeändert.



Spannungs-Stromwandler:

Um eine Spannung in einen Strom umzuwandeln bedient man sich eines modifizierten invertierenden Verstärkers. Um seine Eingänge auszugleichen muß, wie bei dem Invertierenden Verstärker, durch die Widerstände R_1 und R_2 der gleiche Strom fließen. R_L liegt dabei im Weg und der Operationsverstärker muß seine Ausgangsspannung so wählen, daß der Strom durch R_L groß genug ist, um die Eingänge auszugleichen. Um den möglichen Bereich der Stromstärke zu vergrößern, wird der Strom noch aufgeteilt. Da zum Ausgleich der Eingänge nur der Ausgangsstrom beiträgt, ist der Lastwiderstand unbedeutend und darf sogar schwanken. Zu beachten ist, daß die Spannung, die den gewünschten Strom in R_L hervorruft, nicht höher als die Versorgungsspannung sein kann. Wäre das so, hätte man alle Energieprobleme der Welt gelöst! Der Lastwiderstand ist also nur in seiner maximalen Größe beschränkt.



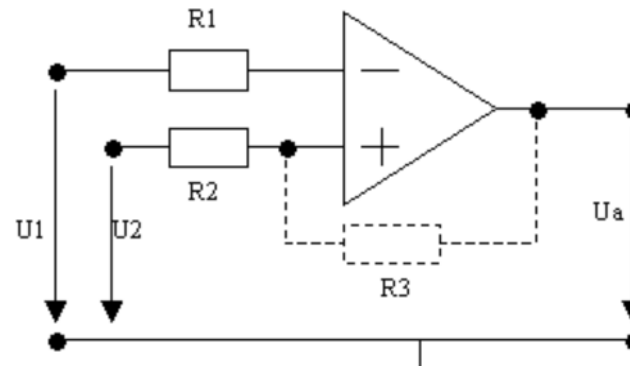
Besondere Anwendungen des Spannungs-Stromwandlers

Stellt man die Eingangsspannung mit einem Potentiometer ein, so erhält man eine präzise Konstantstromquelle für geringe Ströme. R_L ist dann das Objekt, in dem der Strom konstant gehalten werden soll.

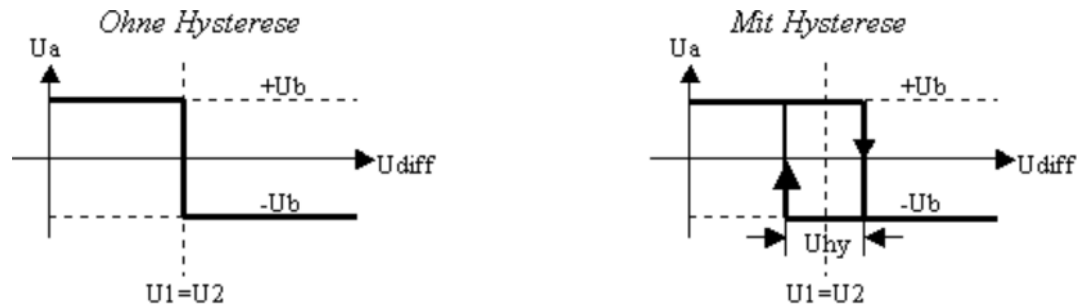
Eine weitere interessante Anwendung des Spannungs-Stromwandlers in Verbindung mit dem Strom-Spannungswandler ist die Übertragung von Spannungssignalen über größere Strecken. Der Strom innerhalb einer Leitung ist an allen Stellen gleich und kommt aus einer Leitung genau so heraus wie er hineingeschickt wurde. Es entstehen zwar Spannungs- und Leistungsverluste innerhalb der Leitung sowohl Potentialunterschiede zwischen den Endgeräten, diese sind aber nicht störend, da nur der Strom "gemessen" wird. Störimpulse werden von dem "sendenden" OPV ausgeglichen. Bei geschickter Dimensionierung können schwache Spannungen nahezu störungsfrei über einige hundert Meter übertragen werden und gleichzeitig in ihrer Amplitude angepaßt werden. Das ist bei Anwendungen nützlich, bei denen die Sensoren in ungünstigen Umgebungen angebracht sind und die langen Leitungen elektromagnetischen Störungen und stark schwankenden Temperaturen ausgesetzt sind. (Beispiel: Temperatur- und Drucksensoren in einem Heizkraftwerk)

Spannungs-Komparator mit und ohne Hysterese:

Ein Komparator vergleicht ständig seine Eingangsgrößen und zeigt digital an, welcher Eingang die größere Spannung besitzt. Da ein Operationsverstärker einen nahezu unendlichen Verstärkungsfaktor besitzt, reicht eine geringe Eingangsspannungsdifferenz, um den Ausgang "in die Sättigung" gehen zu lassen. Der Ausgang der Schaltung kann nur die Zustände $+U_b$ und $-U_b$ annehmen. Versorgt man den Operationsverstärker mit $+5\text{ V}$ und legt $-U_b$ auf Masse, so erhält man am Ausgang ein TTL-Signal zur digitalen Weiterverarbeitung. Sind beide Eingangsspannungen annähernd gleich, so kippt der Ausgang bei der kleinsten Störung oder Veränderung hin und her.



Um das zu vermeiden baut man eine "Hysterese" ein. Das bedeutet, daß bei einem bestimmten Pegel ausgeschaltet, und bei einem niedrigeren Pegel wieder eingeschaltet wird.



Der Ausgang der Schaltung kann nach wie vor nur +Ub oder -Ub annehmen. Der Spannungsteiler bestehend aus R2 und R3 teilt also das Signal entweder gegen die positive oder die negative Versorgungsspannung. Dadurch verschiebt sich der Umschaltpunkt nach oben bzw. nach unten. Die Hysterese läßt sich mit folgender Formel berechnen, wobei es sich bei ΔU_a um die Differenz der beiden Versorgungsspannungen handelt:

$$U_{Th} = \frac{R2}{R2 + R3} \cdot \Delta U_a$$

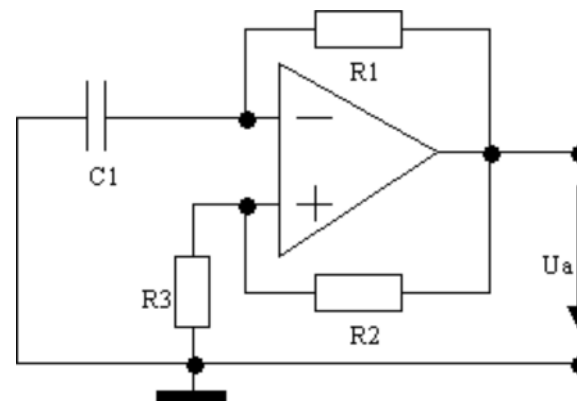
R1 ist nicht unbedingt notwendig, sollte aber den gleichen Wert wie R2 besitzen, um kleine Meßfehler durch den geringen Eingangsstrom des realen OPV's auszugleichen.

Besondere Anwendung des Komparators:

Legt man das Potential einer der beiden Eingänge mit einem zum Spannungsteiler geschalteten Potentiometer fest, so erhält man einen einfachen Schwellwertschalter. So kann man mit einfachen Mitteln z.B. einen Dämmerungsschalter realisieren, Interrupts eines Mikrocontrollers bei bestimmten Bedingungen auslösen, usw.

Astabiler Multivibrator:

Zum besseren Verständnis gehen wir wieder mal davon aus, daß keine Spannungen anliegen und der Kondensator restlos entladen ist. Der Ausgang wird sofort nach dem Einschalten in einen der beiden möglichen Zustände kippen, da kleinste Spannungsdifferenzen an den Eingängen ausreichen, um den Ausgang in die Sättigung zu kippen. In der Praxis wird der OPV wegen Symetrieunterschieden bei der Fertigung beim Einschalten einen bevorzugten Zustand einnehmen. Gehen wir davon aus, daß die Ausgangsspannung einen positiven Wert angenommen hat. Der Spannungsteiler aus R2 und R3 legt eine positive Spannung an den nichtinvertierenden Eingang des OPV's an. Die Spannung an dem invertierenden Eingang wird von dem noch entladenen Kondensator auf Massepotential gehalten. Über R1 lädt er sich langsam auf. Wird die Spannung des Kondensators größer als die



sich langsam auf. Wird die Spannung des Kondensators größer als die des Spannungsteilers am nichtinvertierenden Eingang, so kippt die Ausgangsspannung ins Negative. Der Spannungsteiler legt nun eine negative Spannung an den nichtinvertierenden Eingang an, während der Kondensator langsam über R1 in die andere Richtung umgeladen wird. Ist die negative Spannung am Kondensator größer als die negative Spannung des Spannungsteilers, so kippt der Ausgang wieder ins positive und der Vorgang wiederholt sich. Es entsteht eine symmetrische Rechteckspannung, bei der die "Einschaltzeit" genau so lange dauert, wie die "Ausschaltzeit". Die Frequenz berechnet man mit folgender Formel:

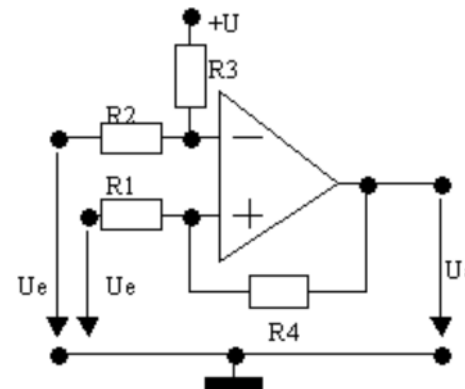
$$T = \frac{1}{f} = 2R1 \cdot C1 \cdot \ln\left(1 + \frac{2 \cdot R3}{R2}\right)$$

Den dazu passenden Widerstand R1 berechnet man anschließend mit:

$$R1 = \frac{R2 \cdot R3}{R2 + R3}$$

Bistabiler Multivibrator:

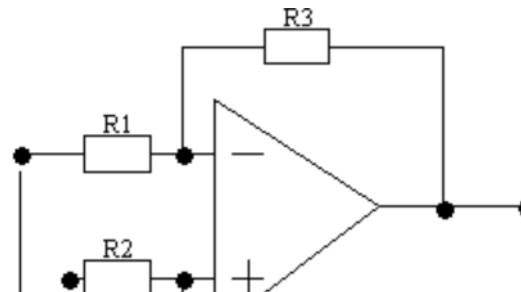
Auch Flip-Flops kann man mit einem OPV realisieren. Nach dem Anlegen der Versorgungsspannung kippt das Flip-Flop in eine der beiden möglichen Zustände. Wir gehen davon aus, daß der Ausgang zunächst negativ (LOW) ist. Über den Widerstand R4 wird der nichtinvertierende Eingang negativ gehalten und damit wiederum den Ausgang negativ hält. Ein positiver Impuls an Ue2 (SET) am nichtinvertierenden Eingang erzeugt eine positive Ausgangsspannung (HIGH). Über R4 wird der nichtinvertierende Eingang positiv gehalten, was wiederum den Ausgang stabilisiert. Ein positiver Impuls (Ue1) an dem invertierenden Eingang (RESET) erzeugt ein negatives Signal an dem Ausgang (LOW), der wiederum durch die Rückkopplung mit R4 gespeichert wird. Bei dieser Schaltung ist zu beachten, daß die Eingangssignale U1 und U2 deutlich stärker sind als die Rückkopplung durch R4. Der Widerstand R3 hält den invertierenden Eingang auf einen definierten Pegel. Diese Schaltung findet in der Praxis äußerst selten eine Anwendung, da das Ausgangssignal symmetrisch und für Digitalschaltungen unbrauchbar ist. Ein asymmetrischer Betrieb ist leider nicht möglich.

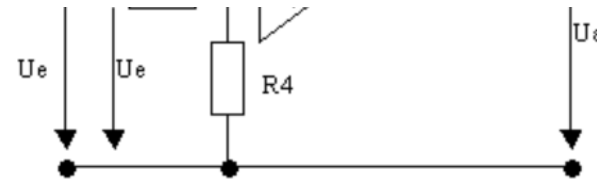


Differenzverstärker:

An sich ist der OPV schon ein richtiger Differenzverstärker. Dummerweise ist der Verstärkungsfaktor viel zu hoch und damit unbrauchbar. Diese Schaltung verringert unter Zuhilfenahme von zwei Spannungsteilern den Verstärkungsfaktor. Diese Schaltung funktioniert nur, wenn R1=R2 und R3=R4 sind, damit die Symmetrie der Eingangssignale stimmt.

Der Verstärkungsfaktor wird durch das Verhältnis R1/R3 bzw. R2/R4 bestimmt. Die Verstärkte Spannungsdifferenz ist nichts anderes als Ue2-Ue1. Die Ausgangsspannung berechnet sich wie folgt:



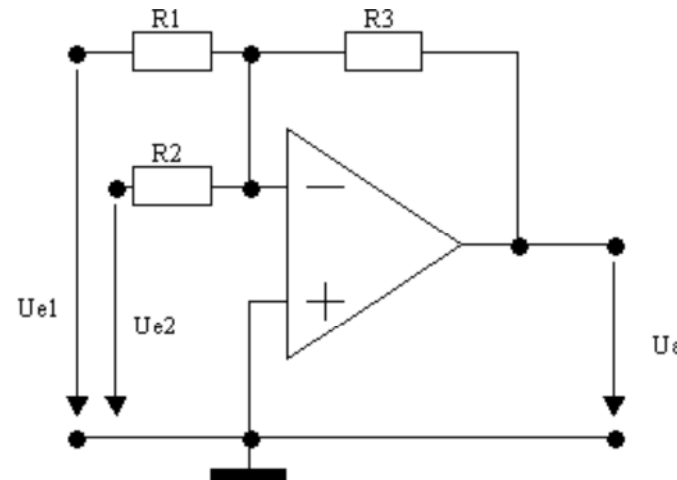


$$U_a = \frac{R_3}{R_1} \cdot (U_{e2} - U_{e1})$$

Summierverstärker:

Ein Operationsverstärker kann auch Rechenoperationen durchführen. Der Summierverstärker beruht auf dem Prinzip des Invertierenden Verstärkers, mit dem Unterschied, daß der Eingangsstrom von zwei unterschiedlichen Signalquellen erzeugt wird. Die beiden einlaufenden Ströme addieren sich und werden wie gewohnt verstärkt.

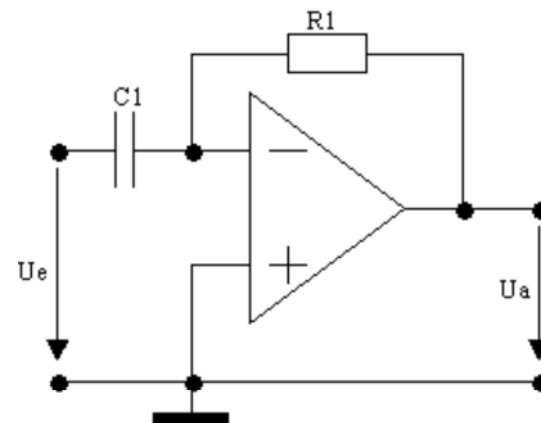
$$U_a = -R_3 \cdot \left(\frac{U_{e1}}{R_1} + \frac{U_{e2}}{R_2} \right)$$



Differenzierer (Hochpaß):

Diese Schaltung beruht ebenfalls auf dem invertierenden Verstärker. Als Eingangswiderstand wird ein Kondensator eingesetzt, der Gleichspannungen und niedrige Frequenzen abblockt, also nur Ströme mit höherer Frequenz durchläßt, die wie beim invertierenden Verstärker weiterverarbeitet werden. Gleichspannungsoffsets werden abgeblockt und tragen am Ausgangssignal nichts bei. Das Verfahren entspricht dem mathematischen differenzieren. Die Größe des Kondensators hängt natürlich von der gewünschten Grenzfrequenz, und die Ausgangsspannung zusätzlich noch von dem Verstärkungsfaktor der Schaltung ab.

$$U_a = -U_e \cdot R_1 \cdot \omega \cdot C_1$$



Integrierer (Tiefpaß):

Integrator (Integrator).

Auch diese Schaltung beruht auf dem invertierenden Verstärker. Nehmen wir mal eine gleichbleibende Eingangsspannung an. Um seine Eingänge ausgeglichen zu halten, muß der OPV immer höhere Spannungen aufbringen, weil sich der Kondensator auflädt und eine Gegenspannung aufbaut. Im theoretischen Fall würde der Vorgang unendlich lange dauern können, während die Ausgangsspannung gegen unendlich gehen würde. Das entspricht rechnerisch einem über unendlich integrierten konstanten Wert. In der Praxis hat der OPV natürlich seine Grenzen durch die Versorgungsspannung, die man mit dem Überlaufen des Wertebereichs eines Taschenrechners vergleichen könnte. Diese Schaltung integriert ein angelegtes Signal über die Zeit und gibt das Ergebnis ununterbrochen aus.

$$U_a = -U_e \cdot \frac{1}{R1 \cdot \omega \cdot C1}$$

