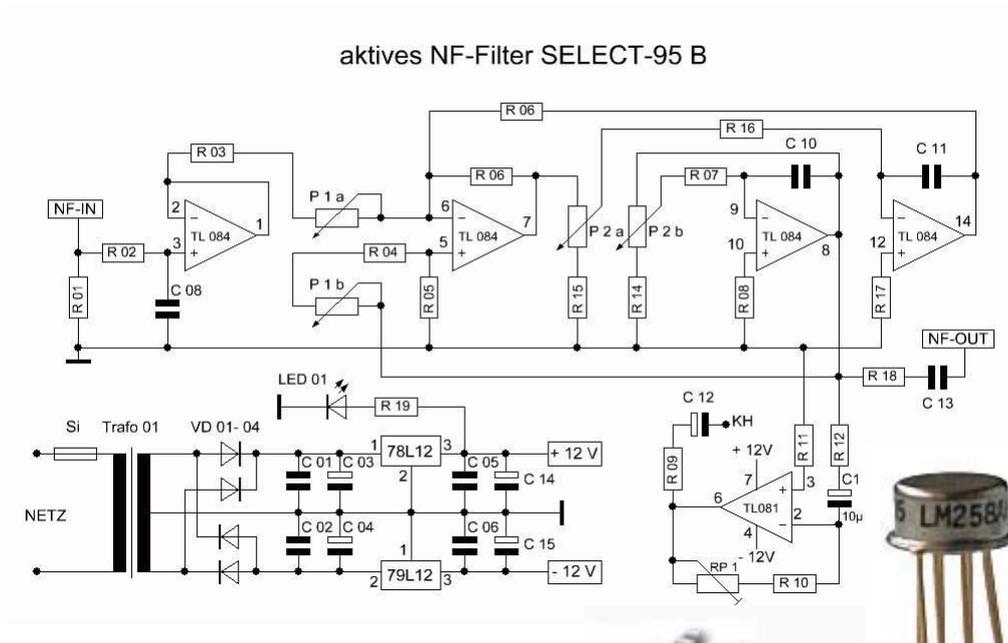


Operationsverstärker-Grundsaltungen

H39-Workshop 2015/2016



Der Einführungskurs wurde von DL6OAA zusammengestellt, verwendet wurden folgende Unterlagen:

<http://www.g-frerichs.de/Start-Frameset/OpAmp%20Grundlagen.pdf>

http://nts.uni-duisburg-essen.de/downloads/get3/GET3_K7_Final.pdf

<http://www.hb9f.ch/bastelecke/pdf/OpAmpNeutralHB9TYX%28080126%29.pdf>

http://www.raffia.ch/?opv_grundlagen

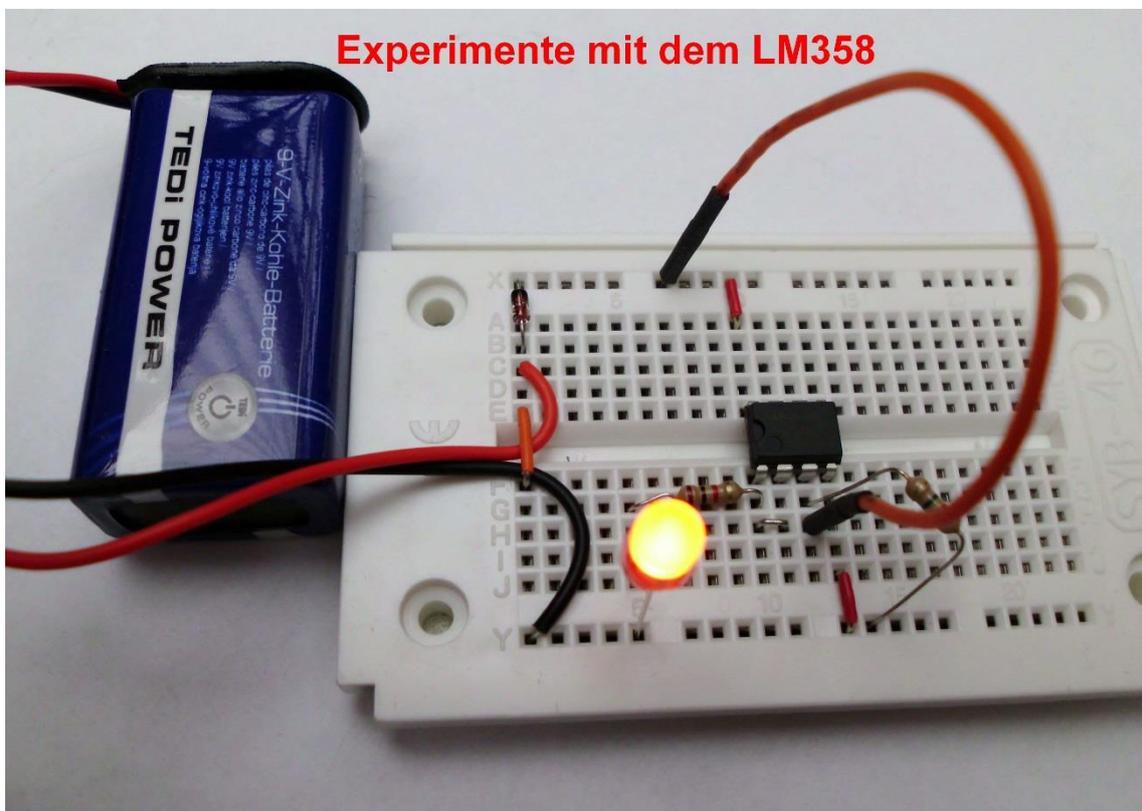
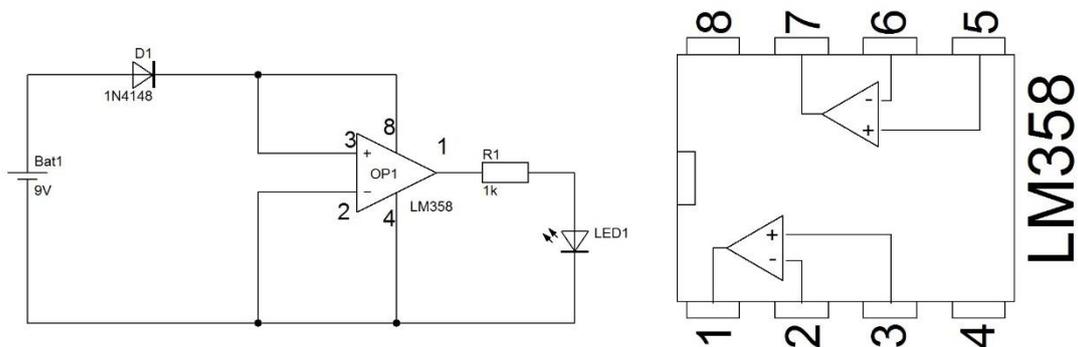
und für den experimentellen Teil:

http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/175000-199999/192010-an-01-de-CONRAD_ADVENTSKALENDER_2010.pdf

<http://www.elektronik-labor.de/Lernpakete/Kalender010.htm>

Versuche mit Operationsverstärkern (LM358) /

Versuch 1.0



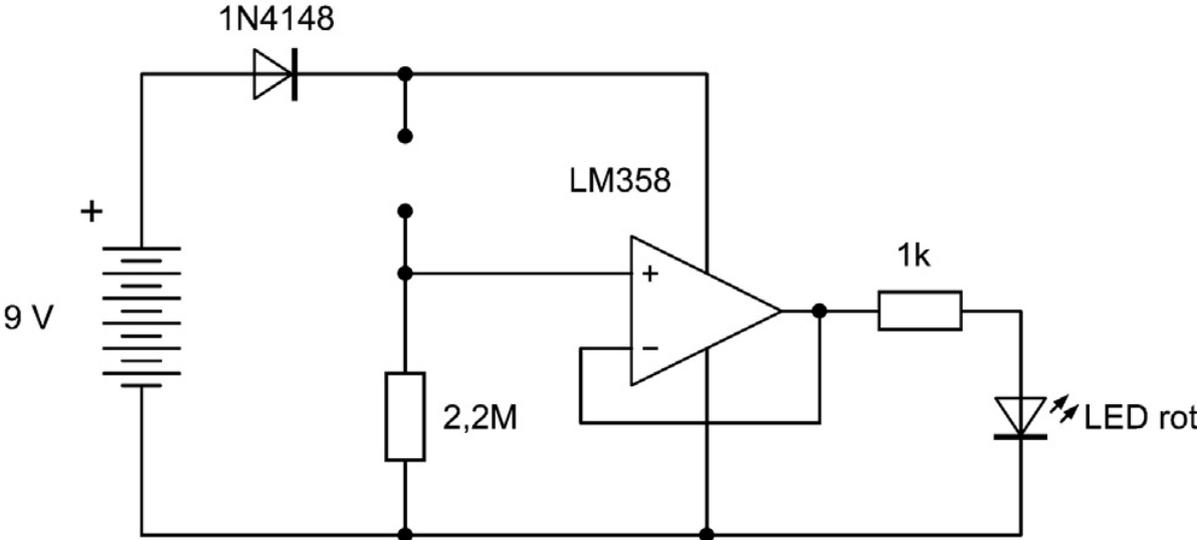
Hinweis: Dieser Aufbau auf dem Steckbrett entspricht nicht der Schaltung von Versuch 1.0!!

Die Differenz der beiden Eingangsspannungen wird etwa 100.000-fach verstärkt. Wenn die Spannung am invertierenden Eingang (-) kleiner ist als die am nicht-invertierenden Eingang (+), wird die Ausgangsspannung positiv.

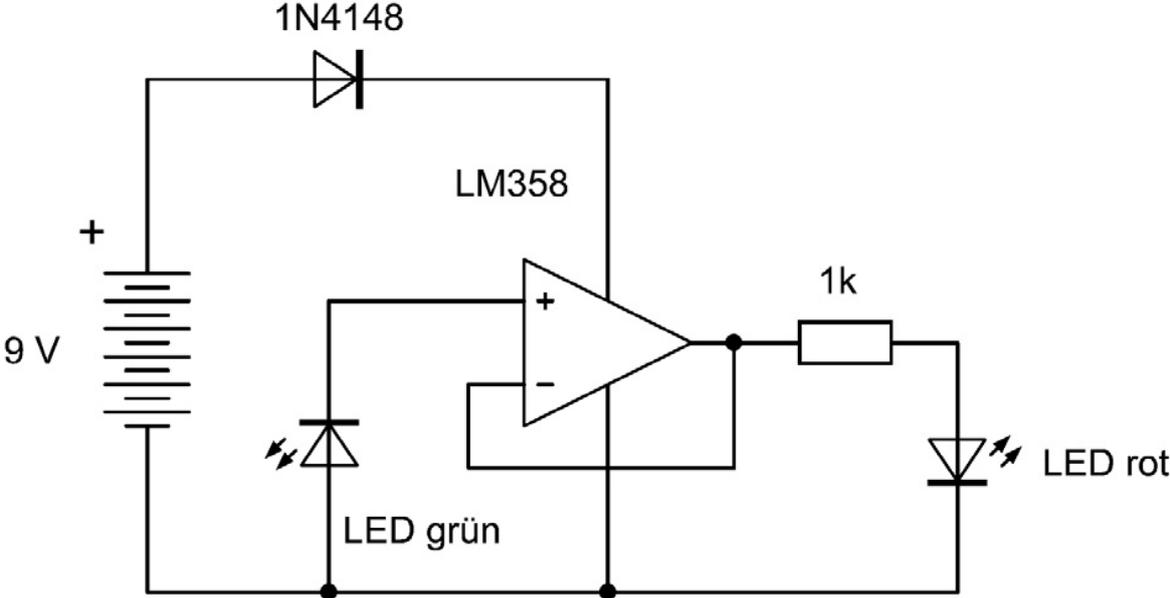
Da hier die Differenz der Eingangsspannungen $\leq U_B$ ist, erscheint am Ausgang eine Spannung nahe der Betriebsspannung U_B (nachmessen).

Die nachfolgenden Schaltungen sind ohne Erklärungen abgebildet. Anhand des Schaltungsnamens kann die Verwendung erkannt werden, die Funktionsweise sollte im gemeinsamen Gespräch erörtert werden. Zu jedem Versuch gibt es einen kleinen Hilfetext im Anhang, der ggf. heran gezogen werden kann.

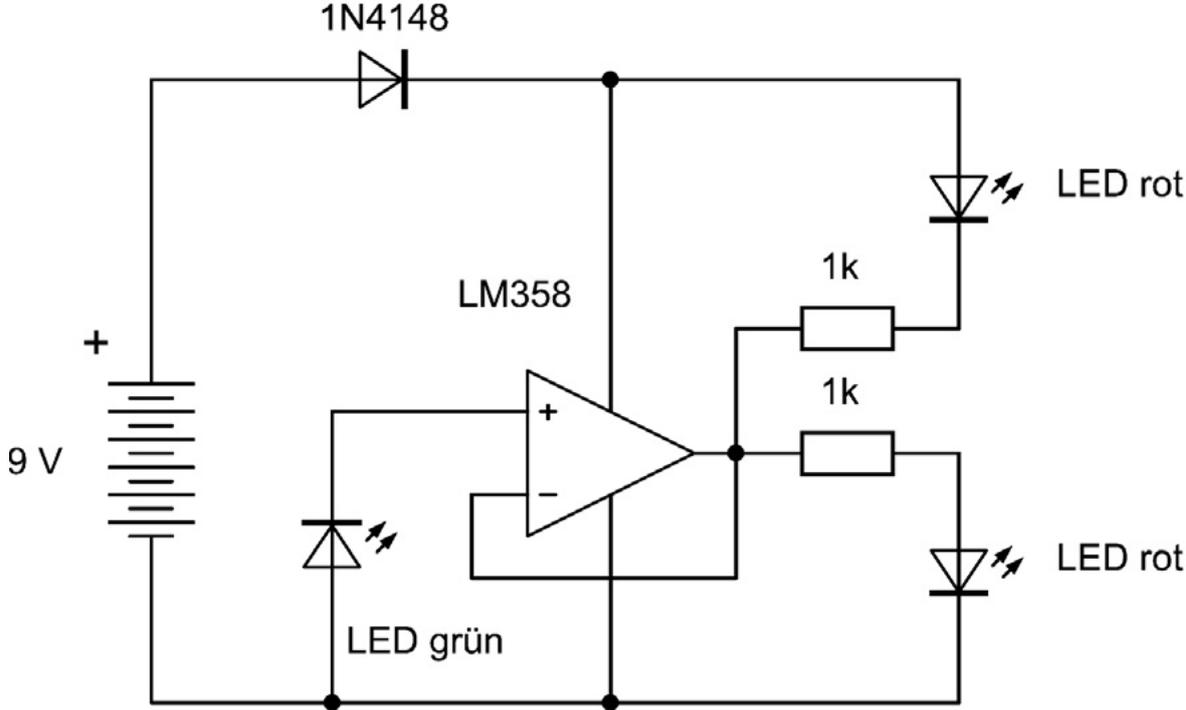
Versuch 2.0: Berührungssensor



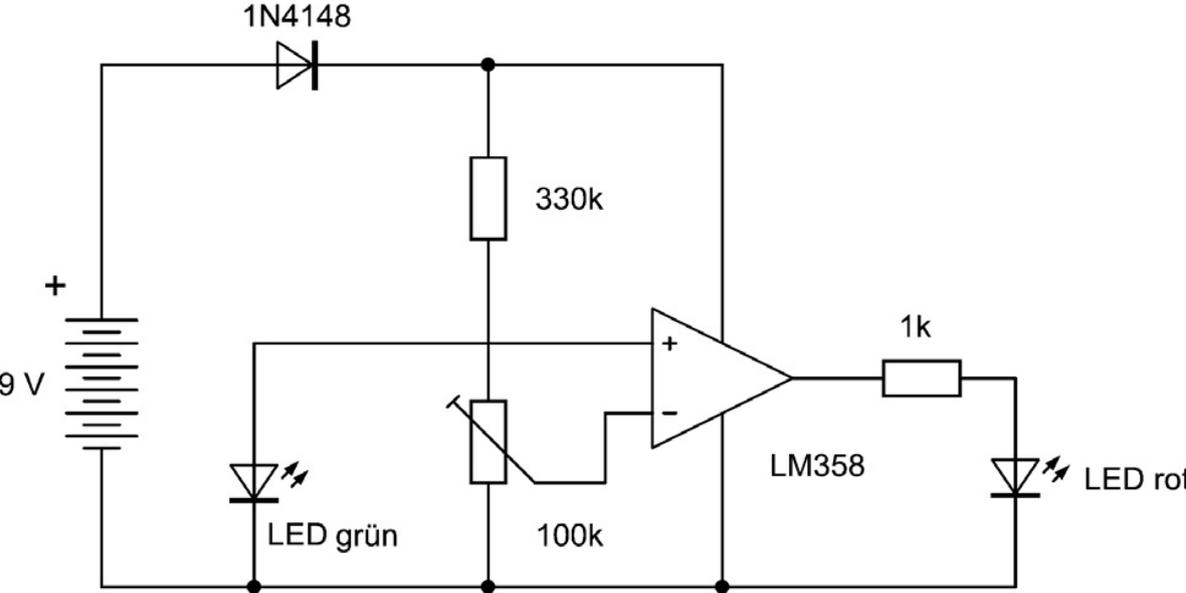
Versuch 3.0: Lichtsensor



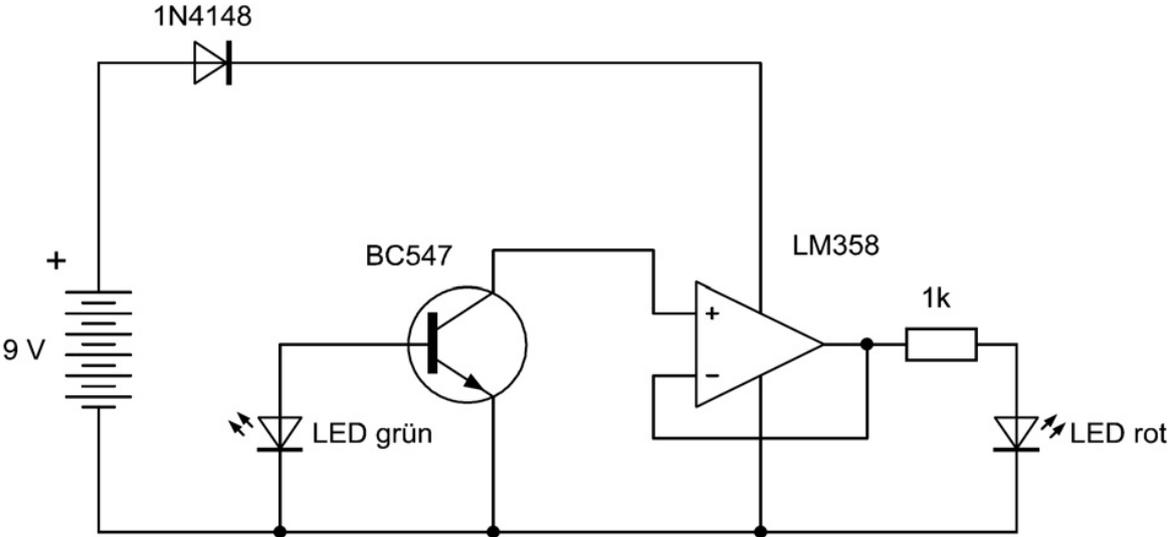
Versuch 4.0: Gegentakt-Lichtsensor



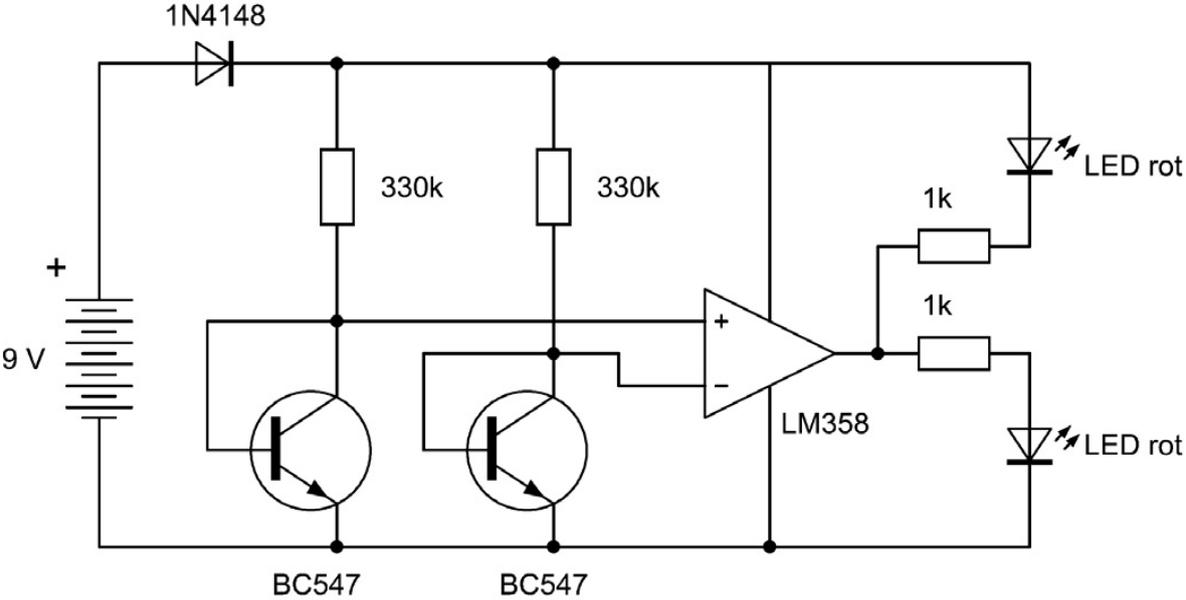
Versuch 5.0: Helligkeitsvergleich



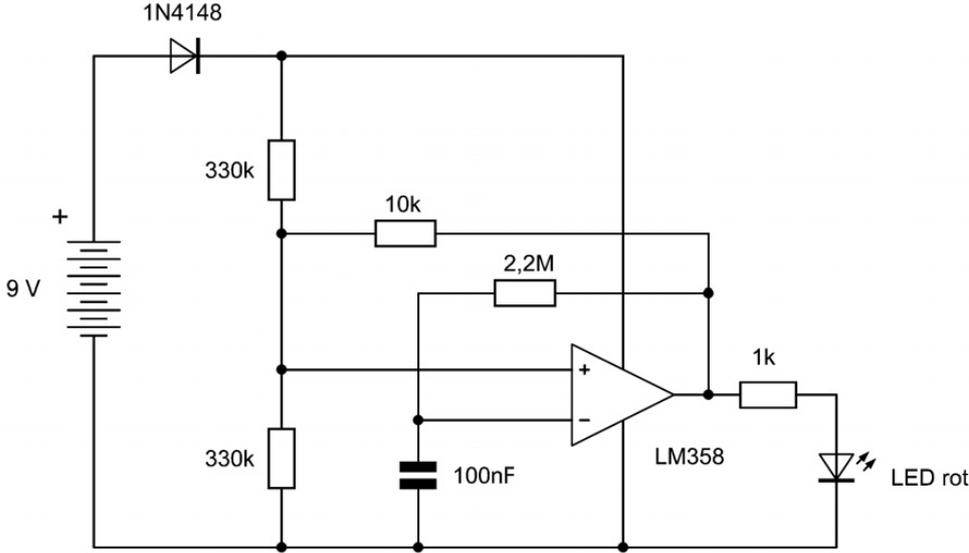
Versuch 6.0: Dämmerungsschalter



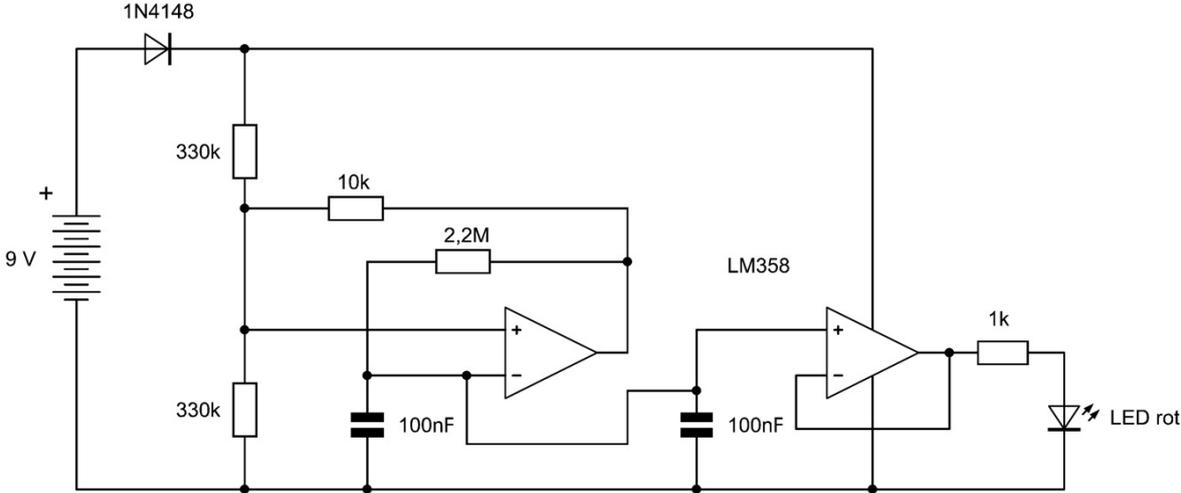
Versuch 7.0: Temperaturvergleich



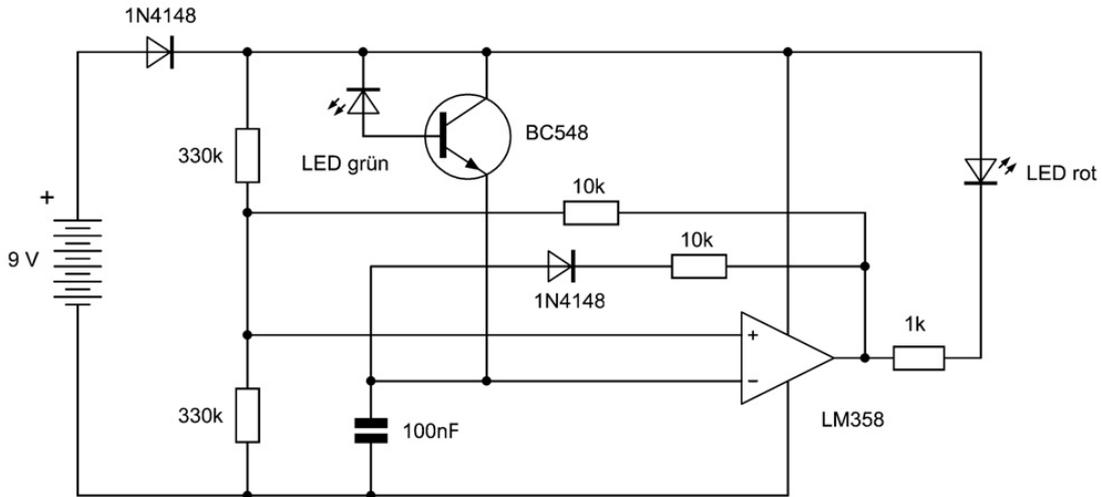
Versuch 8.0: LED-Blinker 1



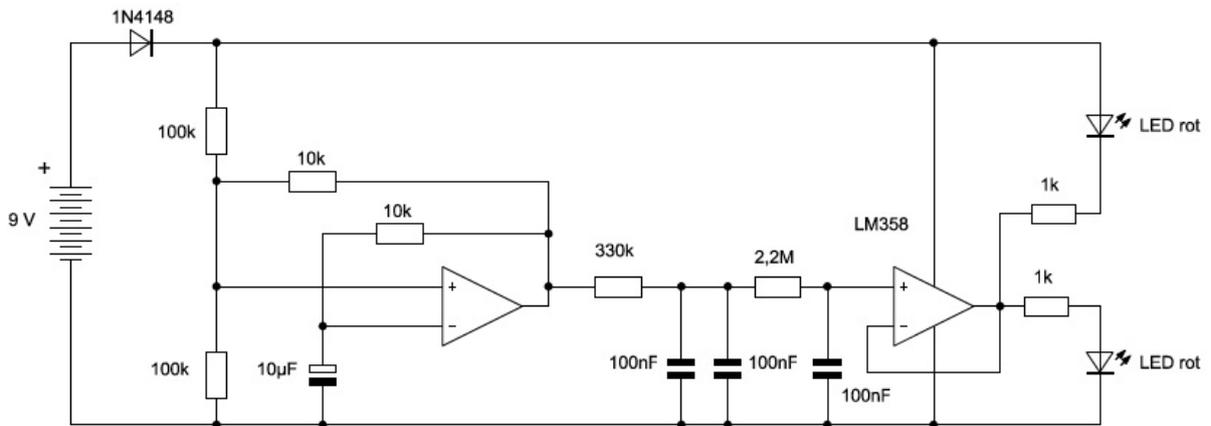
Versuch 9.0: LED-Blinker 2



Versuch 10.0: Lichtgesteuerte Blitze

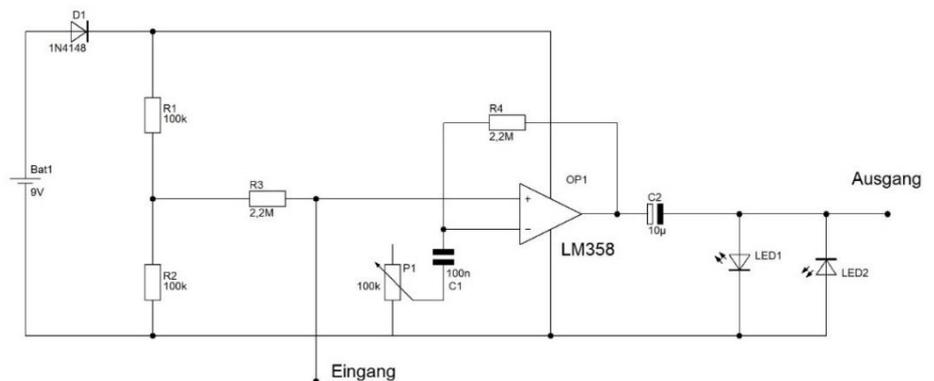


Versuch 11.0: Flackernde Kerzen

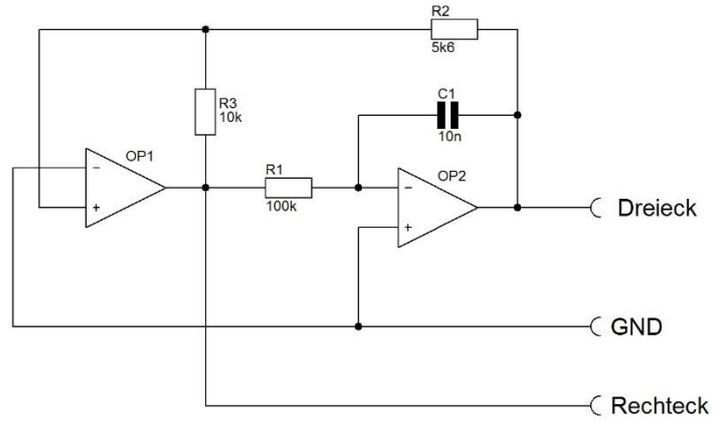


Versuch 12.0: Elektrofeld- Detektor

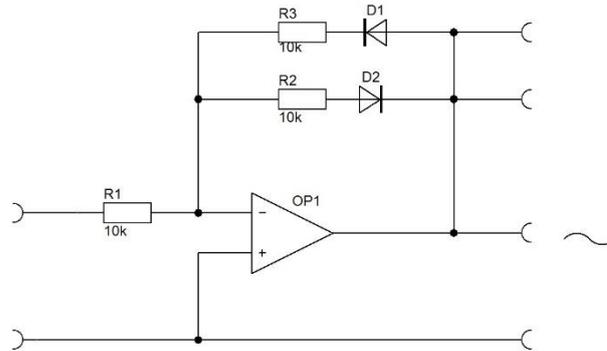
Elektrofeld-Detektor



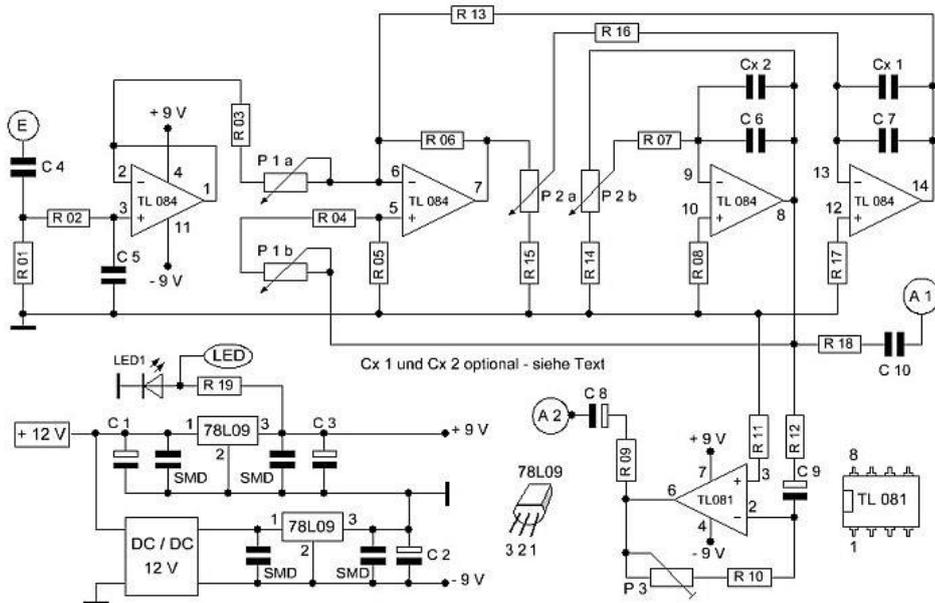
Generator für Dreieck-und Rechtecksignale



Einweggleichrichter



aktives NF-Filter SELECT-95 B



Anhang

Versuch 2: Berührungssensor

Die Schaltung besitzt zwei Anschlüsse, die mit dem Finger berührt werden sollen. Es fließt ein sehr kleiner Strom durch den Finger und durch den Widerstand von 2,2 M Ω . Dabei steigt die Spannung am Widerstand. Der nachfolgende OPV arbeitet bei starker Gegenkopplung mit der Spannungsverstärkung 1, denn der Ausgang ist direkt mit dem invertierenden Eingang verbunden. Die Spannung wird also nicht verstärkt, wohl aber der Eingangsstrom. Mit dem sehr geringen Sensorstrom schalten Sie daher die LED ein. Berühren Sie die Kontakte verschieden stark. Die LED-Helligkeit kann damit beeinflusst werden.

Versuch 3: Lichtsensor

In diesem Versuch soll die LED_{grün} jedoch nicht leuchten, sondern als Lichtsensor dienen. Die LED wird hier in Sperrrichtung betrieben, also mit der Anode an der negativen Betriebsspannung. Wenn Licht auf die LED fällt, fließt ein kleiner Strom.

Versuch 4: Gegentakt-Lichtsensor

Damit können Sie die gegensätzliche Reaktion zweier LEDs erzeugen. Bei großer Helligkeit geht die obere LED an, bei geringer Helligkeit die untere.

Versuch 5: Helligkeitsvergleich

Die hohe Verstärkung des OPV ermöglicht es, Spannungen an den beiden Eingängen zu vergleichen. Wenn die Spannung am Pluseingang größer ist als die am Minuseingang, geht die LED an. Dabei reicht ein Unterschied von 1 mV (1 Tausendstel Volt) für eine klare Reaktion. Hier wird die grüne LED wieder als Lichtsensor eingesetzt, aber diesmal ist sie anders herum eingebaut. Die LED arbeitet dabei als Fozelle und gibt eine Spannung bis etwa 1,5 V ab. Am Poti kann nun eine gleiche Spannung eingestellt werden, um kleinste Unterschiede zu erkennen.

Versuch 6: Dämmerungsschalter

Der Transistor BC547B wird als Stromverstärker für den LED-Lichtsensor benötigt. Die grüne LED dient hier wieder als Fozoelement und liefert einen kleinen Strom. Wegen der hohen Stromverstärkung des Transistors reicht nun schon eine geringe Umgebungshelligkeit, um die LED auszuschalten. Bei einem Einsatz als Dämmerungsschalter geht die LED am Abend automatisch an.

Versuch 7: Temperaturvergleich

Die Transistoren werden in diesem Versuch nicht wie meist üblich als Verstärker eingesetzt, sondern als Temperatursensor. Basis und Kollektor des Transistors sind verbunden. Die Schaltung arbeitet als empfindlicher Komparator. Zwei LEDs zeigen an, welcher der beiden Sensoren die höhere Temperatur hat. Wenn der linke Transistor wärmer ist, leuchtet die obere LED, wenn der rechte Transistor die höhere Temperatur hat, leuchtet die untere LED. Durch Berühren eines der Transistoren kann der Zustand leicht umgeschaltet werden. Wenn zwei Personen die Sensoren berühren, zeigt sich, wer die höhere Temperatur erreicht. Aufgrund von Exemplarstreuungen der Transistoren kann ein kleiner Spannungsunterschied auftauchen, sodass in einigen Fällen eine etwas größere Temperaturdifferenz erforderlich wird, um den Zustand der LEDs umzuschalten.

Versuch 8: LED-Blinker 1

Der Kondensator lädt sich immer wieder auf, bis die Schaltung in den Aus-Zustand kippt. Dann dauert es genauso lange, bis er wieder ausreichend entladen ist, um unter die Spannung am positiven Eingang zu kommen, womit der Operationsverstärker in den An-Zustand kippt. Insgesamt blinkt die LED etwa einmal pro Sekunde.

Versuch 9: LED-Blinker 2

Diesmal wird der zweite OPV im LM358 als Verstärker eingesetzt. An seinem Ausgang erscheint die gleiche Spannung wie am Ladekondensator, der hier aus zwei parallel geschalteten keramischen Kondensatoren mit je 100 nF besteht. Der zweite OPV wird als Pufferverstärker eingesetzt. Der hochohmige Eingang belastet die Blinkschaltung nicht, während der niederohmige Ausgang genügend Strom für die LED liefern kann.

Versuch 10: Lichtgesteuerte Blitze

Diese Schaltung ist eine weitere Variante des schon bekannten LED-Blinkers, wobei allerdings sehr kurze rote Lichtblitze entstehen. Die Diode sorgt für unterschiedlich lange Lade- und Entladezeiten. Die grüne LED dient als Lichtsensor, deren Sensorstrom durch den Transistor verstärkt wird. Die Blitzfrequenz hängt von der Helligkeit ab. Bei direkter Beleuchtung mit einer hellen Lampe geht das Blitzen in ein Dauerleuchten über.

Versuch 11: Flackernde Kerzen

Frohe Weihnachten.....

Versuch 12: Elektrofild-Detektor

Viele elektrische Leitungen und Geräte um uns herum sind von elektrischen Wechselfeldern umgeben, die mit einem geeigneten Verstärker sichtbar gemacht werden können. Bei dem Elektrofild-Detektor soll das Poti zunächst so eingestellt werden, dass die LEDs gerade noch leuchten. Hält man den Antennendraht nah an ein elektrisches Gerät, entsteht eine leine Wechselfeldspannung am Eingang des Verstärkers. Die verstärkte Wechselfeldspannung am Ausgang wird über einen Koppelkondensator an die beiden antiparallel geschalteten LEDs gelegt. Bei ausreichend großer Wechselfeldspannung leuchten beide.

Operationsverstärker Einführungslehrgang H39-Workshop 2015/2016

Der vorliegende Einführungskurs erläutert anhand von praktischen Beispielen (Versuchen) einige Anwendungen von Operationsverstärkern.

Ich habe aus verschiedenen Quellen eine Zusammenfassung erstellt – wer etwas tiefer in die Materie einsteigen möchte, findet unter folgenden Quellen gute Anregungen:

<http://www.g-frerichs.de/Start-Frameset/OpAmp%20Grundlagen.pdf>

http://nts.uni-duisburg-essen.de/downloads/get3/GET3_K7_Final.pdf

<http://www.hb9f.ch/bastelecke/pdf/OpAmpNeutralHB9TYX%28080126%29.pdf>

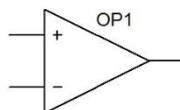
http://www.raffia.ch/?opv_grundlagen

Der Operationsverstärker ist ein aktuelles elektronisches Bauteil, es ist eine integrierte Verstärkerschaltung mit einem historischen Namen. Die ersten Anwendungsgebiete dieses integrierten Bauelementes lagen in der Rechentechnik bzw. in der Regelungstechnik. Dort wurden diese integrierten Bauelemente für mathematische Operationen wie z.B. Addieren und Subtrahieren von Spannungswerten, Umsetzen von digitaler Information in Spannungswerte eingesetzt. Daher der Name: Operationsverstärker. Die Namens-Kurzform (Bauteilbezeichnung) lautet „OP“ oder auch „OpAmp“ (Operations Amplifier).

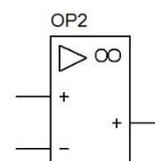
Der Einsatz der OpAmps ist dort zu finden, wo analoge Signale bearbeitet und verarbeitet werden müssen. Die Kenntnis der internen Schaltung und ihrer Funktion ist für die praktische Anwendung nicht von Bedeutung.

Anwenderschaltungen werden im Wesentlichen durch die äußere Beschaltung des OpAmp's bestimmt. Es reicht also, den Integrierten Verstärker (OpAmp) durch ein Schaltsymbol darzustellen. Operationsverstärker haben stets 2 Eingänge (einen positiven und einen negativen) und einen Ausgang. Den positiven Eingang bezeichnet man auch als „nicht-invertierenden Eingang“ und den negativen Eingang als „invertierenden Eingang“. Für das Phasenverhalten gilt: Eine Spannung am negativen Eingang steht mit einer Phasendrehung von 180° verstärkt am Ausgang zur Verfügung. Eine Spannung am positiven Eingang steht ohne Phasendrehung verstärkt am Ausgang zur Verfügung. OpAmp's werden in der Regel mit einer symmetrischen Betriebsspannung betrieben (z.B. +/- 12V). Der besseren Übersicht wegen werden diese Anschlüsse

sowohl beim Schaltsymbol als auch in Schaltplänen nicht dargestellt (eingezeichnet).



Schaltsymbol für einen OpAmp nach US-Norm

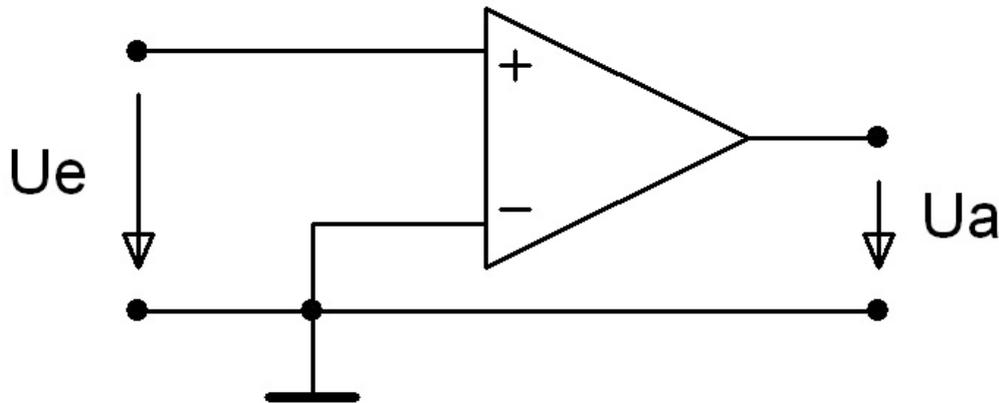


Schaltsymbol für einen OpAmp nach Euro-Norm

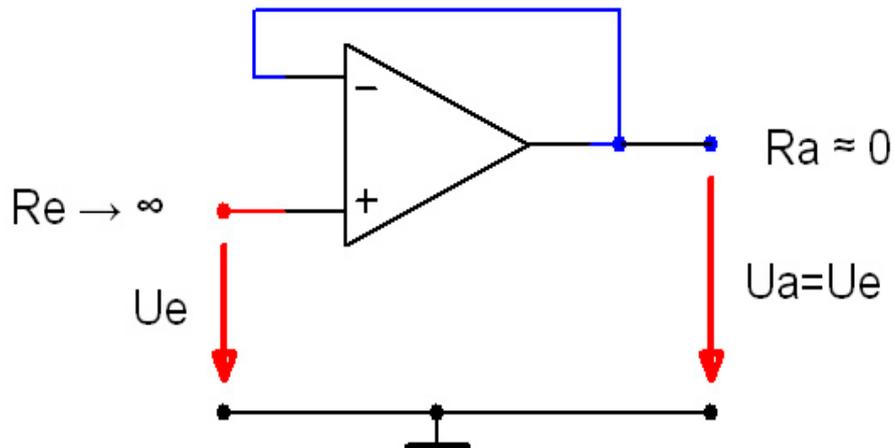
Die wesentlichen Merkmale eines Operationsverstärkers:

Tabelle 1.1.1

Eigenschaft	Ideal	Typisch
Leerlaufverstärkung V_0	unendlich groß	Zwischen 10^4 und 10^7
Eingangswiderstand $r_e =$	unendlich groß	$> 1 \text{ M}\Omega$ bei FET-Typen praktisch unendlich groß
Ausgangswiderstand	0Ω	$10^6 \dots 10^{14} \Omega$
Untere Grenzfrequenz	0 Hz	0 Hz
Obere Grenzfrequenz	0 - unendlich Hz	$10 \text{ Hz} - 10 \text{ kHz}$ Mit schaltungstechnischen Maßnahmen und speziellen Operationsverstärkern kann dieser Wert wesentlich höher liegen, bis hinein in den GHz- Bereich
Eingangsstrom (bei unbeschaltetem OPamp)	$0 \text{ A} \rightarrow$ In die Eingänge des idealen OpAmp fließt kein Strom!	Liegt im nA- oder sogar pA- Bereich
Max. Ausgangsstrom	unendlich groß	ca. $15\text{-}20 \text{ mA}$



Schema des Impedanzwandlers



So kann der Impedanzwandler in einem Schema identifiziert werden

- Besitzt einen Eingang
- Die Eingangsspannung liegt am nicht-invertierenden Eingang
- Der Ausgang ist direkt am invertierenden Eingang angeschlossen

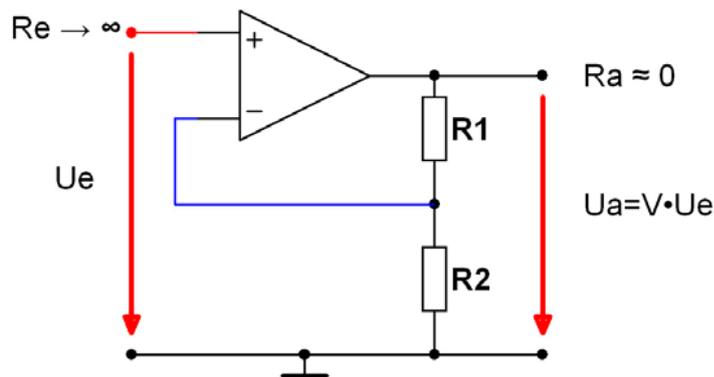
Der nicht-invertierende Eingang ist nicht beschaltet und daher entspricht der Eingangswiderstand dem des OpAmp. Siehe auch Tabelle 1.1.1. Weshalb folgt aber die Ausgangsspannung 1:1 der Eingangsspannung? Charakteristisch für den Impedanzwandler ist die direkte Gegenkopplung des Ausgangssignals über den invertierenden Eingang. In der Abb. ist dieser Gegenkopplungspfad blau eingezeichnet. Vergewenwärtigen wir uns die Definition: „Ein Operationsverstärker verstärkt die Differenzspannung zwischen invertierendem- und nicht-invertierendem Eingang“.

Wenn $U_a = U_e$ ist, ist dann nicht automatisch die Differenz an den Eingängen 0V und der Ausgang ist auch 0V?

In der Realität ist die Differenz an den Eingängen nie ganz 0V. Wegen der hohen Verstärkung des OpAmp werden aber auch kleinste Abweichungen so verstärkt, dass U_a sehr nahe an U_e herankommt. Wir untersuchen jetzt, was passiert, wenn der Ausgang tatsächlich „beschlossen hat“ gegen den Massebezugspunkt abzudriften. Wir gehen davon aus, dass zum Zeitpunkt t_0 U_a ein ganz wenig tiefer liegt als U_e . Dies bedeutet umgekehrt, dass der nicht-invertierende Eingang gegenüber dem invertierenden um einen kleinen Betrag positiver wird. Diese kleine Differenz wird vom OpAmp stark verstärkt und U_a wird sofort wieder positiver. Wird U_a aber positiver, wird auch die Differenz an den Eingängen kleiner. Nach kurzer Zeit wird wieder der stationäre (eingependelte) Zustand erreicht. Dieser Regelkreis funktioniert auch, wenn U_a etwas größer gegenüber U_e werden sollte. Die Ausgangsspannung kann also nicht anders, als der Eingangsspannung 1:1 zu folgen. Deshalb wird diese Schaltung auch **Spannungsfolger** genannt. Die Verstärkung beträgt 1 was 0dB entspricht.

Mit diesen Überlegungen erklärt sich auch der Ausgangswiderstand, der praktisch 0Ω beträgt. Wird der Ausgang etwas belastet, so dass U_e von U_a abweicht, wird U_a sofort wieder auf den Sollwert nachgeregelt. Das Verhalten ist also so, als ob der Ausgang extrem niederohmig wäre.

Schema des nicht-invertierenden Verstärkers



So kann der nicht-invertierende Verstärker in einem Schema identifiziert werden

- Besitzt nur einen Eingang
- Die Eingangsspannung liegt am nicht-invertierenden Eingang
- Der Ausgang ist über einen Spannungsteiler am invertierenden Eingang angeschlossen

Die Verstärkung berechnet man überschlägig:

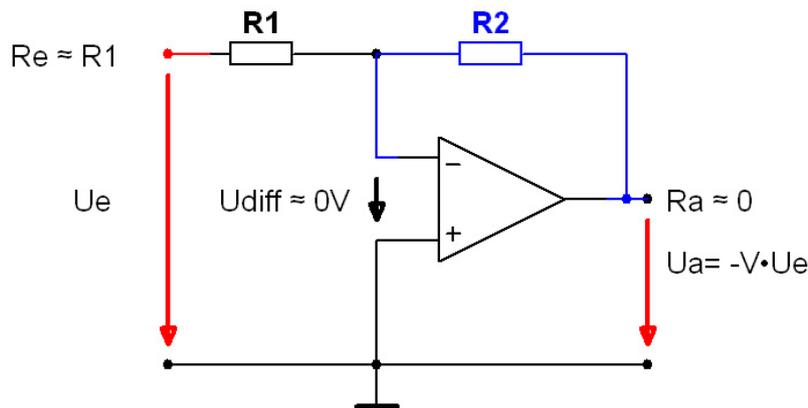
$$V = 1 + \frac{R2}{R1}$$

Achtung:

Die Widerstände können von Schaltbild zu Schaltbild unterschiedlich nummeriert sein. Der Widerstand über dem Bruchstrich muss derjenige sein, der direkt am Ausgang des OpAmp angeschlossen ist (bei der Schaltung oben wäre das dann R1!).

Beim nicht-invertierenden Verstärker folgt das Ausgangssignal U_a dem Eingangssignal. Steigt U_e , so steigt auch U_a , sinkt U_e so sinkt auch U_a . Im Unterschied zum Impedanzwandler findet aber zusätzlich eine Spannungsverstärkung statt. Typisch für den nicht-invertierenden Verstärker ist der hohe Eingangswiderstand. Der nicht-invertierende Verstärker kann also immer dort eingesetzt werden, wo die Quelle möglichst nicht belastet werden darf. Im Unterschied zum Impedanzwandler fällt auf, dass die Gegenkopplung, im Schema blau eingezeichnet, nicht direkt am Ausgang des OpAmp angeschlossen wird, sondern über den Spannungsteiler, gebildet aus R1 und R2, am invertierenden Eingang angeschlossen wird. Ein stationärer Zustand tritt, wie beim Impedanzwandler, erst ein, wenn die Differenzspannung zwischen invertierendem Eingang und nicht-invertierendem Eingang 0V wird. Damit dies erreicht wird, muss U_a größer als U_e werden, da U_a über den Spannungsteiler herunter geteilt wird. Damit wird eine Spannungsverstärkung erreicht, die abhängig ist von R1 und R2.

Schema des invertierenden Verstärkers



So kann der invertierende Verstärker in einem Schema identifiziert werden

- Besitzt nur einen Eingang
- Der nicht-invertierende Eingang liegt am gemeinsamen Bezugspunkt (Masse)
- Die Eingangsspannung liegt – meistens - über einen Widerstand am invertierenden Eingang

Die Verstärkung berechnet man überschlägig

$$V = -\frac{R2}{R1}$$

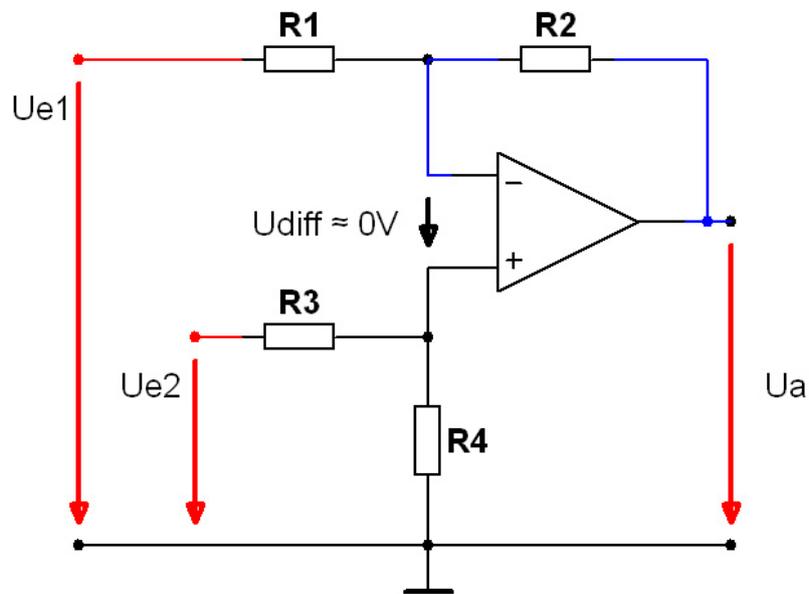
Achtung:

Die Widerstände können von Schaltbild zu Schaltbild unterschiedlich nummeriert sein. Der Widerstand über dem Bruchstrich muss derjenige sein, der direkt am Ausgang des OpAmp angeschlossen ist.

Beim invertierenden Verstärker ist das Ausgangssignal gegenüber dem Eingangssignal um 180° phasenverschoben. Steigt die Eingangsspannung U_e an, sinkt die Ausgangsspannung U_a . Sinkt die Eingangsspannung U_e , steigt die Ausgangsspannung U_a an. Beim invertierenden Verstärker hängt der Eingangswiderstand von der äußeren Beschaltung ab und ist daher nicht so hochohmig wie beim nicht-invertierenden Verstärker.

Das Gegenkopplungsprinzip – im Schema blau eingezeichnet - wird auch beim invertierenden Verstärker angewendet. Der nicht-invertierende Eingang liegt auf dem Massebezugspunkt. Der OpAmp wird daher die Ausgangsspannung so regeln, dass die Spannung im Knotenpunkt von R1 und R2 sehr nahe an das Potential des Massebezugspunktes herankommt resp. U_{diff} möglichst klein wird. Da der Knotenpunkt von R1 und R2 praktisch auf dem Potential des Massebezugspunktes liegt, wird der Eingangswiderstand durch R1 bestimmt. U_{diff} nimmt im stationären Zustand, d.h. wenn U_{diff} so klein geworden ist, dass der OpAmp keine Differenz mehr feststellen kann, einen Wert in der Größenordnung von $<1\text{mV}$ an. In den meisten Schaltungen kann diese Differenz dann als 0V angenommen werden, was den Rechenaufwand vereinfacht.

Der Differenzverstärker



So kann der Differenz-Verstärker in einem Schema identifiziert werden

- Besitzt zwei Eingänge, wobei einer über einen Widerstand auf den invertierenden und der andere, ebenfalls über einen Widerstand, auf den nicht-invertierenden Eingang führt.
- Der nicht-invertierende Eingang des OpAmp wird über einen Spannungsteiler gespeist und am invertierenden Eingang liegen der Eingangswiderstand und der Gegenkopplungswiderstand.

Der Differenzverstärker verstärkt die Differenzspannung der an den beiden Eingängen U_{e1} und U_{e2} anliegenden Spannungen. Im Unterschied zum Impedanzwandler, nicht-invertierendem - und invertierendem Verstärker, die alle je nur einen Eingang besitzen, besitzt der Differenzverstärker zwei Eingänge. Die Eingangsspannung an U_{e2} wird über den Spannungsteiler - gebildet aus $R3$ und $R4$ - dem nicht-invertierenden Eingang zugeführt. Wenn $U_{e2} = 0V$ ist, so verhält sich die Schaltung mit dem Eingang U_{e1} genau gleich, wie ein invertierender Verstärker. Wird die Spannung an U_{e2} ein wenig angehoben oder abgesenkt, so wird der OpAmp U_a solange nachregeln, bis U_{diff} wieder $0V$ wird. Wie viel nachgeregelt werden muss, hängt sowohl von den Spannungsteiler-Widerständen $R3$ und $R4$ als auch von $R1$ und $R2$ ab. Das bedeutet, U_a ist abhängig von U_{e1} , U_{e2} , $R1$, $R2$, $R3$ und $R4$, U_a ist eine also Funktion in Abhängigkeit der Parameter U_{e1} , U_{e2} usw...

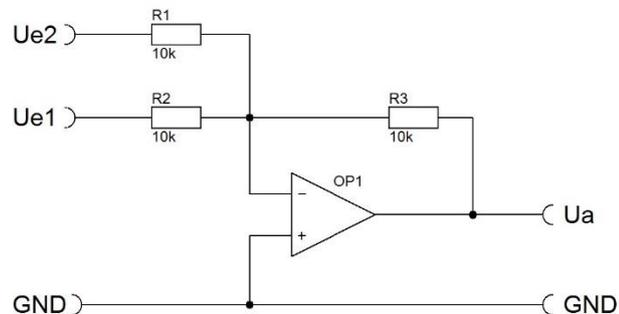
In den Schaltbildern wird für die Differenzspannung an den Eingängen des OpAmp oft das Symbol \approx (ungefähr) verwendet. Es soll darauf hinweisen, dass die Differenzspannung nicht exakt $0V$ ist, sondern um einen kleinen Betrag von $0V$ abweicht. Wäre die Differenzspannung nämlich effektiv $0V$, so wäre ja auch die Ausgangsspannung $0V$. Je größer aber die Leerlaufverstärkung G (Open Loop) eines OpAmp ist, desto näher kommen wir an den theoretischen Wert von $0V$ heran, da ja kleinste Differenzen so stark verstärkt werden, dass sich der Regelkreis sofort wieder einpendelt.

Addierer

Diese Schaltung ist eng mit dem invertierenden Verstärker verwandt, sie wurde lediglich um einen zusätzlichen Eingang erweitert. Mit solch einem Addierer lassen sich die Spannungen von mehreren Quellen addieren, auch wenn diese nicht entkoppelt sind. Beispiel: Drei Batterien lassen sich, da sie voneinander völlig entkoppelt sind, einfach in Reihe schalten um ihre Spannungen zu addieren. Jedoch ist dies mit drei Netzgeräten nicht möglich, da diese ein gemeinsames Erdungspotential besitzen. Jedes Netzgerät liefert seine Spannung in Bezug zu diesem Null-Potential. Schaltet man diese drei Netzgeräte hintereinander so ergibt sich als Gesamtspannung nicht der Summe der Einzelspannungen. Mit dieser Operationsverstärkerschaltung wäre es jedoch möglich, die einzelnen Spannungen der drei Netzgeräte zu addieren. Dies funktioniert, da jedes Netzteil an die "virtuelle Masse" und den invertierenden Eingang angeschlossen ist und es so zu keinen Beeinflussungen der Netzgeräte untereinander kommt.

Bei den Eingangsspannungen ist unbedingt das Vorzeichen zu berücksichtigen. Addierer werden auch Summierverstärker genannt. Der Summierverstärker ist ein wichtiges Bindeglied zwischen analoger (realer) Welt und der digitalen (virtuellen) Welt. Mit Hilfe von Summierverstärkern lassen sich relativ einfach Analog-Digitalwandler realisieren.

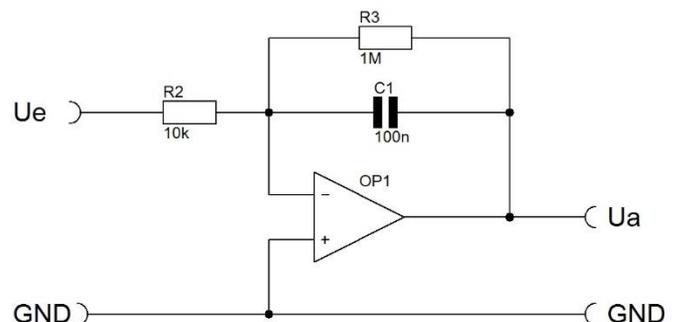
Addierer



Integrierer (Tiefpass 1.Ordnung)

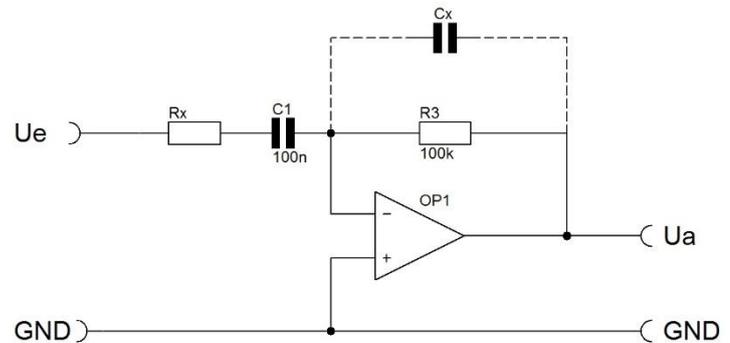
Auch der Integrierer ist nahe mit dem invertierenden Verstärker verwandt, hier wird jedoch über einen Kondensator anstelle eines Widerstands rückgekoppelt. Es wird also die Eingangsspannung integriert und die Negation davon ausgegeben. Der zum Kondensator parallele Widerstand R3 wäre unter idealen Bedingungen unnötig. Falls man jedoch ein nicht perfekt symmetrisch um Null schwingendes Eingangssignal verwendet, lädt sich der Kondensator immer stärker auf und das Ausgangssignal "wandert" stetig in eine Richtung bis dessen Maximum bzw. Minimum erreicht wird. Dies kann durch den Widerstand R3 verhindert werden, da er ein Entladen des Kondensators ermöglicht.

Integrierer



Differenzierer (Hochpass 1.Ordnung)

Differenzierer



Durch Vertauschen des Widerstands und Kondensators beim Integrierer erhält man den Differenzierer. Grundsätzlich kann ein Differenzierer mit einer einfachen RC-Beschaltung realisiert werden. Durch die in der Praxis endliche Leerlaufverstärkung arbeitet die Schaltung ab ωC nicht mehr als Differenzierer, sondern als Verstärker und aufgrund der internen Kapazitäten ab ωC sogar als Integrator. Um Rauschen oder Schwingen zu vermeiden, werden zusätzlich R_x und C_x vorgesehen.