

Themenblatt

Operationsverstärker noch in

1 Allgemeines

Für den Operationsverstärker gibt es zwei Arten von Symbolsymbolen (Abbildung 1).

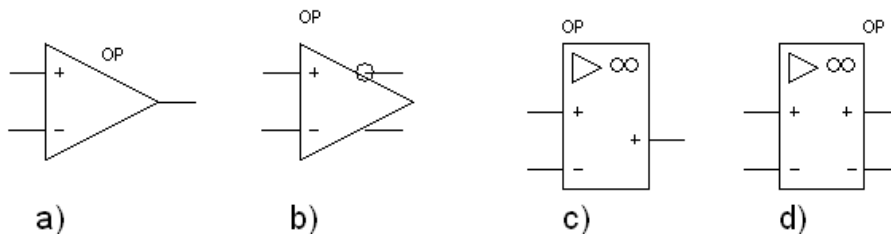


Abbildung 1: Für den Operationsverstärker existieren zwei Symbole

Abbildung 1a und Abbildung 1d besitzen auch einen zusätzlichen invertierenden Ausgang. In den meisten Anwendungen kommt aber die Variante in Abbildung 1a und Abbildung 1c vor.

1.1 Warum Operationsverstärker?

Operationsverstärker sind neben den Transistoren die wichtigsten Bauteile um Signale zu verstärken. Um die Beschaltung eines Transistorverstärkers zu berechnen sind viele Rechnungen notwendig. Dies liegt daran, dass die Eigenschaften eines Transistors nicht ideal sind und somit direkten Einfluss auf die Schaltung haben. Diesen Nachteil haben Operationsverstärker weit aus weniger, denn sie bewegen sich in Richtung ideale Bauteile.

Beispielsweise hat ein Operationsverstärker einen sehr, sehr hohen Eingangswiderstand. Das bedeutet, dass er die Signalquelle an seinem Eingang nicht belastet. Die Signalquelle arbeitet fast im Leerlauf und liefert damit auch fast die Leerlaufspannung.

Des weiteren hat er einen sehr kleinen Ausgangswiderstand. So hat die Belastung durch eine Last wenig Einfluss auf die Ausgangsspannung. Der Operationsverstärker ist eine fast ideale Spannungsquelle.

Diesen Zusammenhang verdeutlicht die Abbildung 2 .

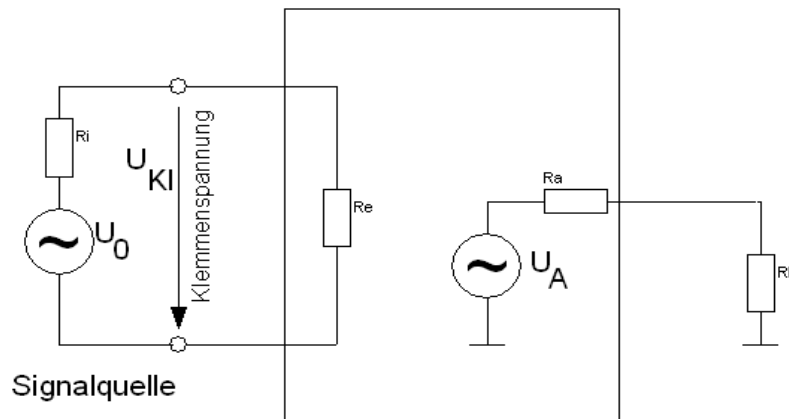


Abbildung 2: Einfluss der Ein- und Ausgangswiderstände

Man erkennt, dass R_i der Signalquelle und R_e des Verstärkers eine Reihenschaltung und damit einen Spannungsteiler bilden. Für den Fall $R_i = R_e$ (Leistungsanpassung) würde die Klemmenspannung U_{KI} nur noch die Hälfte von U_0 betragen. Damit hat der Verstärker auch weniger Spannung zur Verfügung die er letztendlich verstärken kann. Ist R_e aber viel, viel größer als R_i , dann bekommt der Verstärker fast U_0 zum Verstärken angeboten.

Genauso verhält es sich mit dem Ausgang. Je kleiner R_a ist, desto mehr Strom kann dem Verstärker entnommen werden¹.

2 Der ideale Verstärker

Ein idealer Verstärker hat somit einen Eingangswiderstand der gegen unendlich geht und einen Ausgangswiderstand gegen 0. Eine weitere Forderung an einen idealen Verstärker ist ein Verstärkungsfaktor gegen

¹ Allerdings gibt es aber durchaus Verstärker deren Ausgangswiderstand genau so groß sein muss wie der Lastwiderstand

unendlich. Warum? Eine unendliche Verstärkung wird fast nie benötigt. Damit muss die Verstärkung auf den gewünschten Wert reduziert werden. Solch eine Reduktion hat den Vorteil, dass auch die Fertigungsschwankungen der Verstärkung um den entsprechenden Faktor verkleinert werden. Dadurch haben die Produkte in der Serienfertigung viel kleinere Toleranzen bzw. Abgleichmaßnahmen können entfallen.

Eine weitere wichtige Eigenschaft eines idealen Verstärkers ist die Möglichkeit eine Signalinvertierung zu erzeugen. Hat der Verstärker dazu einen zweiten Eingang, der das Signal invertiert, kann man wählen, ob das Ausgangssignal eine Umkehrung erfahren soll, oder nicht.

Bei Transistorverstärker werden zur Ein- und Auskopplung der Nutzsignale i.d.R. Kondensatoren benötigt. da der Arbeitspunkt für eine symmetrische Aussteuerung bei ca. $0,5 U_B$ liegt. Diese Kondensatoren begrenzen aber die untere Grenzfrequenz und somit die Qualität des Verstärkers. Ideal wäre es, könnte man diese Kondensatoren einfach weglassen. Dazu ist aber eine Aussteuerung auch in Richtung negativer Spannungen notwendig. Die lässt sich aber nur Erreichen, wenn sogenannte bipolare Spannungsversorgungen² verwendet werden.

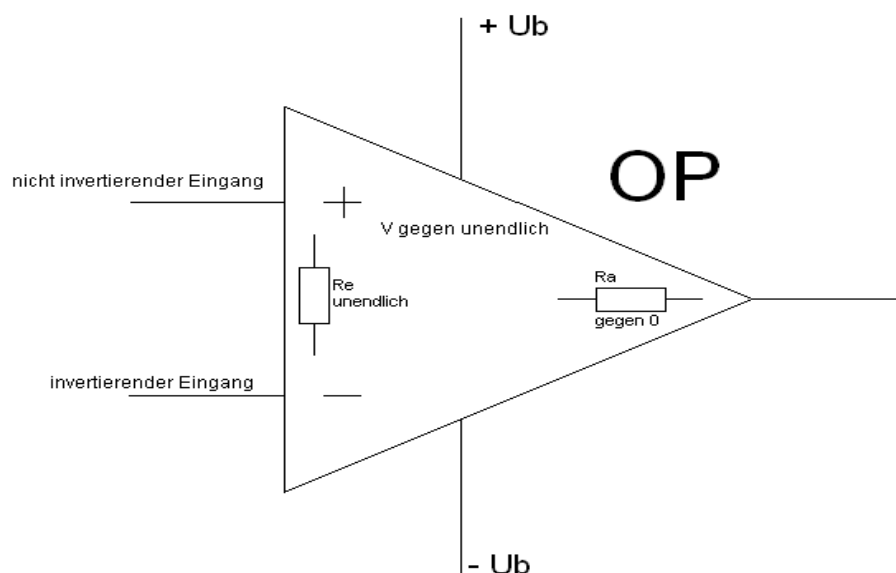


Abbildung 3: Die wichtigsten Eigenschaften eines "idealen" Operationsverstärkers

² Siehe dazu auch Seite 16ff.

3 Der reale Operationsverstärker

Beim realen Operationsverstärker ist der Eingangswiderstand nicht unendlich, aber er liegt bei einigen hundert Kilo- bis einige hundert Megaohm. Selbst einige Teraohm sind durchaus machbar. Damit ist aber die Bedingung R_e gegen Unendlich fast erreicht. In der Praxis bedeutet das, dass der Eingangswiderstand nur noch in wenigen Fällen berücksichtigt werden muss.

Ähnlich verhält es sich mit dem Ausgangswiderstand. Auch er kann nie wirklich Null sein. Aber ein Wert zwischen 10 Ohm und 100 Ohm ist vergleichsweise klein, bzw. vernachlässigbar, wenn der Eingangswiderstand der nachfolgenden Stufe einige -zig Kiloohm aufweist.

Wenn man Werte von 1 bis 100 für die geschlossene Schleifenverstärkung (das entspricht der gewünschten Gesamtverstärkung) benötigt, sind eine offene Schleifenverstärkung von 100 000 und mehr auch fast ideale Bedingungen.

3.1 Gleichtaktverstärkung

Schließt man den + und den - Eingang kurz, sollte die Ausgangsspannung exakt Null Volt betragen. Das ist bei realen Operationsverstärkern leider nicht der Fall. Aufgrund von Asymmetrien im Innern ist die Ausgangsspannung mehr oder weniger von 0 Volt unterschieden. In vielen Fällen stellt dies kein Problem dar, wenn doch, muss mittels Abgleich dieser Offset kompensiert werden. Dazu haben manche Operationsverstärker extra Anschlüsse, die mit einem passenden Widerstand beschaltet werden.

3.2 Frequenzgang

Der Operationsverstärker kann Signale mit einer Frequenz von 0 Hz bis einige hundert Kilohertz oder auch Megahertz verstärken. Dabei weist er aber ein Tiefpassverhalten auf, das die maximale obere Grenzfrequenz festlegt. In Abbildung 4 ist ein solcher Frequenzgang, wird auch als Bode-

Diagramm bezeichnet, zu sehen. Auffällig ist, dass bei der Leerlaufverstärkung v_0 die Grenzfrequenz (Eckfrequenz) sehr niedrig ist (blaue Linie). Wird dagegen die Gesamtverstärkung (geschlossene Schleifenverstärkung)

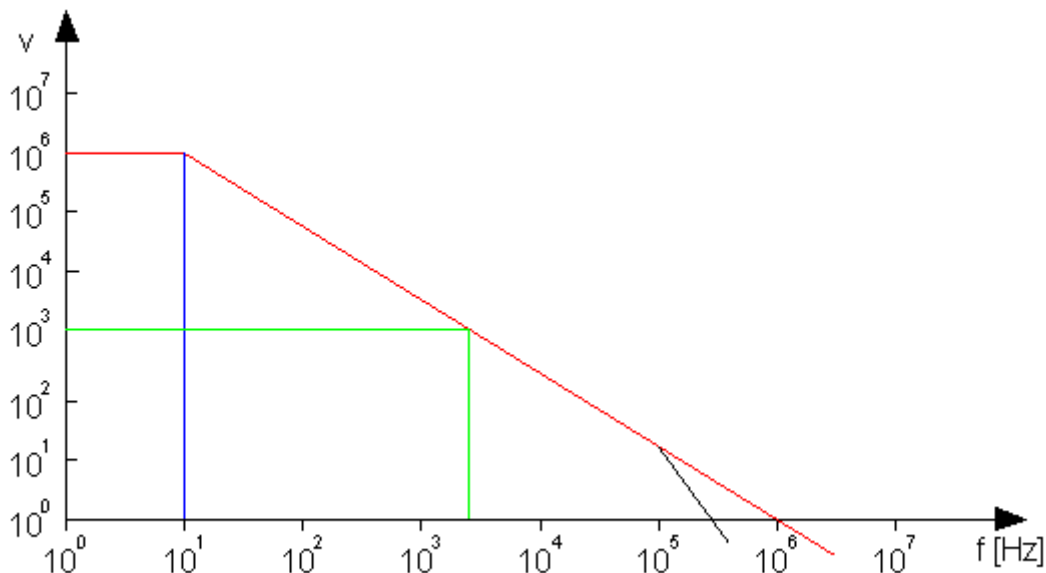


Abbildung 4: Frequenzgang eines Operationsverstärkers (Bode-Diagramm)

reduziert, erhöht sich die Grenzfrequenz. Ein Beispiel zeigt die grüne Kennlinie. Bei einer Verstärkung von 1000 beträgt die Grenzfrequenz ca. 1,8 kHz.

Die Steigung der roten Kennlinie beträgt -20 dB pro Dekade. D.h.: wird die Verstärkung um 20 dB verkleinert, steigt die Grenzfrequenz um den Faktor 10.

Bei manchen Operationsverstärkern kann es sein, dass bei sehr hohen Frequenzen zusätzliche parasitäre Einflüsse wirksam werden und sich deshalb die Steigung auf -40 dB pro Dekade vergrößert (schwarze Kennlinie im Bereich 10^5 Hz).

4 Gegenkopplung

Eine Reduzierung der Verstärkung erreicht man am Besten durch eine sogenannte Gegenkopplung. Gegenkopplung ist eine Rückkopplung eines Teils des Ausgangssignals mit umgekehrtem Vorzeichen auf den Eingang³. Durch den Grad der Rückkopplung hat man direkten Einfluss auf die Gesamtverstärkung. Abbildung 5 zeigt einen gegengekoppelten Verstärker.

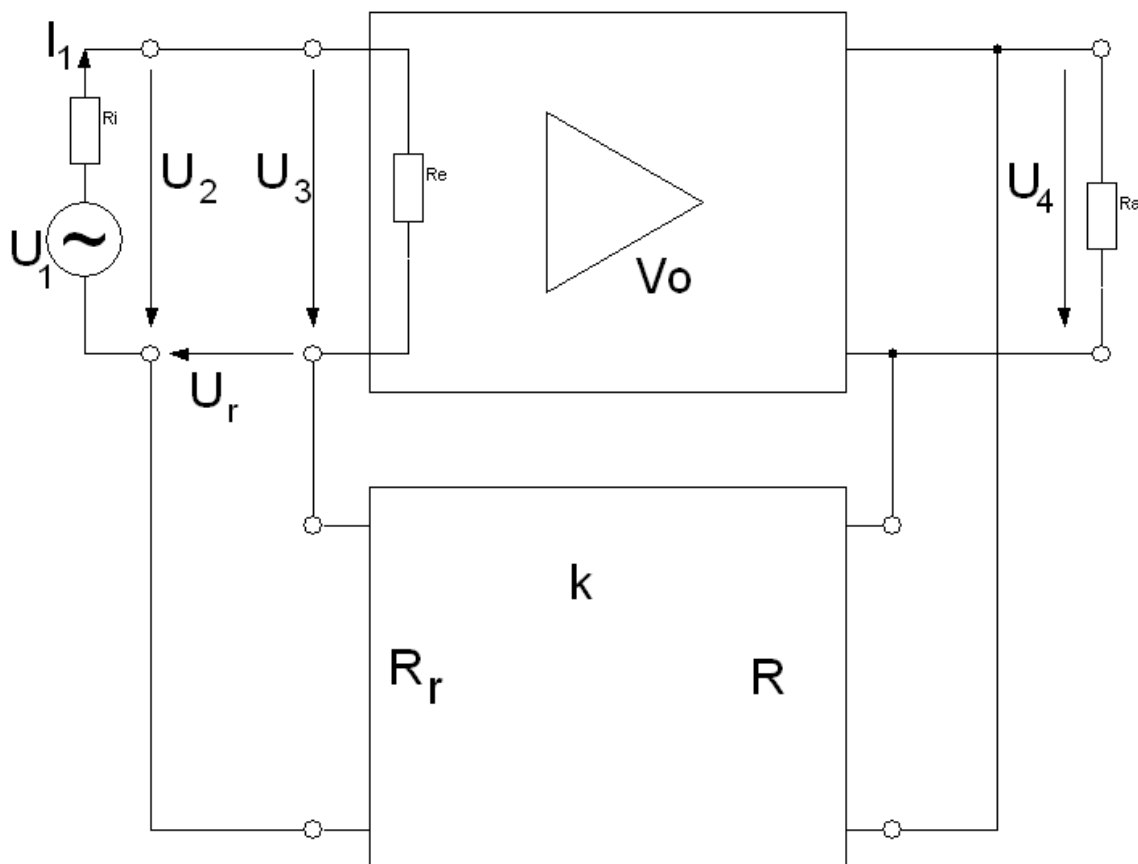


Abbildung 5: Gegengekoppelter Verstärker

Das obere Rechteck stellt einen Verstärker mit der Leerlaufverstärkung V_o dar. Statt Leerlaufverstärkung wird oft auch die Bezeichnung „offene Schleifenverstärkung“ verwendet, da ein rückgekoppelter Verstärker auch als Regelkreis betrachtet werden kann. Der Eingangswiderstand dieses

³ Neben der Gegenkopplung gibt es noch die Mitkopplung. Hier wird ein Teil des Ausgangssignals gleichphasig zum Eingang zurückgeführt. Dadurch wird das Ausgangssignal immer größer. Beispiel: Pfeifen in einem Lautsprecher – Mikrofon System.

Verstärkers ist R_i . Dieser belastet die Spannungsquelle U_1 mit deren Innenwiderstand R_i . U_3 ist die Eingangsspannung die vom Verstärker mit V_0 verstärkt

Auf der Ausgangsseite treibt dieser Verstärker die Last R_a , an der die Spannung U_4 abfällt.

Die Rückkopplung wird im unteren Rechteck dargestellt. Sie führt einen Teil der Ausgangsspannung U_4 zum Eingang zurück. Handelt es sich um eine Gegenkopplung, muss das rückgeführte Signal U_r so beschaffen sein, dass es von der Spannung U_2 abgezogen wird. Bei einer Mittkopplung wird U_r zur Klemmenspannung U_2 addiert.

Über die Maschengleichungen erhält man folgende Beziehungen:

Klemmenspannung U_2 :

$$U_2 = U_0 - I_1 * R_i \quad (1)$$

Eingangsspannung U_3 :

$$U_3 = U_2 - U_r \quad (2)$$

Die Leerlaufverstärkung V_0 :

$$V_0 = \frac{U_4}{U_3} \quad (3)$$

Übertragungsfaktor des Gegenkopplungs-Vierpol k :

$$k = \frac{U_r}{U_4} \quad (4)$$

Die geschlossene Schleifenverstärkung V berechnet sich aus:

$$V = \frac{U_4}{U_2} \quad (5)$$

U_3 erhält man durch Umstellung aus (3)

$$U_3 = \frac{U_4}{V_0} \quad (3a)$$

Die zurückgeführte Spannung U_r lässt sich aus (4) herleiten:

$$U_r = k U_4 \quad (4a)$$

Setzt man nun (3a) und (4a) in (1) ein, bekommt man:

$$\frac{U_4}{V_0} = U_2 - k \cdot U_4 \quad (1a)$$

$$U_2 = \frac{U_4}{V_0} + k \cdot U_4 \quad (1b)$$

$$U_2 = U_4 \left(\frac{1}{V_0} + k \right) \quad (1c)$$

$$\frac{U_4}{U_2} = \frac{1}{\frac{1}{V_0} + k} \quad (1d)$$

Setzt man (5) in (1d) ein, erhält man den Verstärkungsfaktor A des gegengekoppelten Verstärkers.

$$V = \frac{1}{k + \frac{1}{V_0}} \quad (6)$$

Betrachtet man diese Formel (6) genauer, erkennt man, dass bei einer sehr großen Leerlaufverstärkung⁴ V_0 der Term $\frac{1}{V_0}$ sehr klein wird und damit u.U. vernachlässigbar ist. Es ergäbe sich dann eine geschlossene Schleifenverstärkung von

$$V = \frac{1}{k} \quad (7)$$

⁴ Was eine sehr große Leerlaufverstärkung bedeutet wird auf Seite 33 erläutert.

Damit würde die geschlossene Schleifenverstärkung nur noch von den Eigenschaften des Rückkopplungsnetzwerks abhängen.

Was muss dieses Rückkopplungsnetzwerk leisten? Zum Einen muss es sein Eingangssignal auf ein gewünschtes Maß reduzieren und muss es noch invertieren, da sein Ausgangssignal von der Klemmenspannung der Signalquelle subtrahiert werden muss.

Diese Signalinvertierung kann aber auch an einer anderen Stelle erfolgen. Wie bei der Vorstellung des idealen Verstärkers (siehe Seite 2) beschrieben, hat dieser einen eigenen invertierenden Eingang. Somit braucht unser Rückkopplungsnetzwerk nur noch die Amplitude der zurückgeführten Spannung festlegen. Das lässt sich einfach durch einen Spannungsteiler erledigen.

Abbildung 6 zeigt das Rückkopplungsnetzwerk in Form eines Spannungsteilers. Die Signalinvertierung ist dabei noch nicht explizit realisiert.

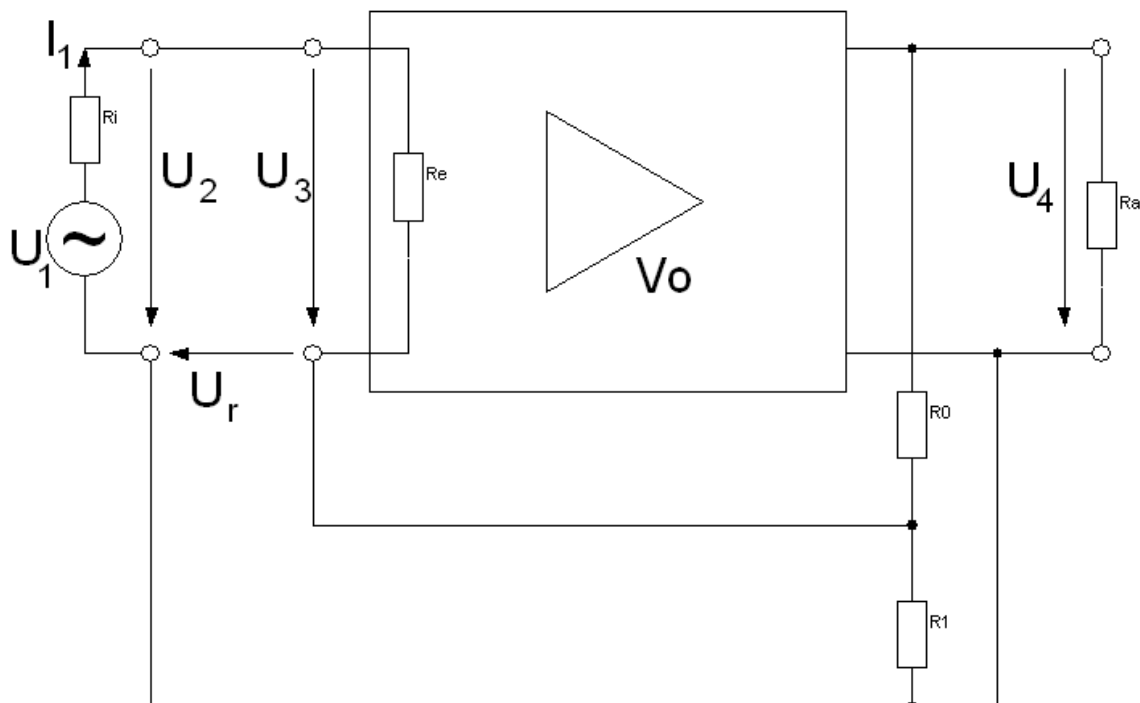


Abbildung 6: Ein Spannungsteiler als Rückkopplungsnetzwerk

In Abbildung 7 wird ein zusätzlicher Eingang, der ein Eingangssignal invertieren kann, verwendet. Dieser Eingang ist für die Umkehrung von U_r zuständig. Man erhält eine Schaltung, deren geschlossene Schleifenverstärkung nur vom Spannungsteile aus R_0 und R_1 abhängt.

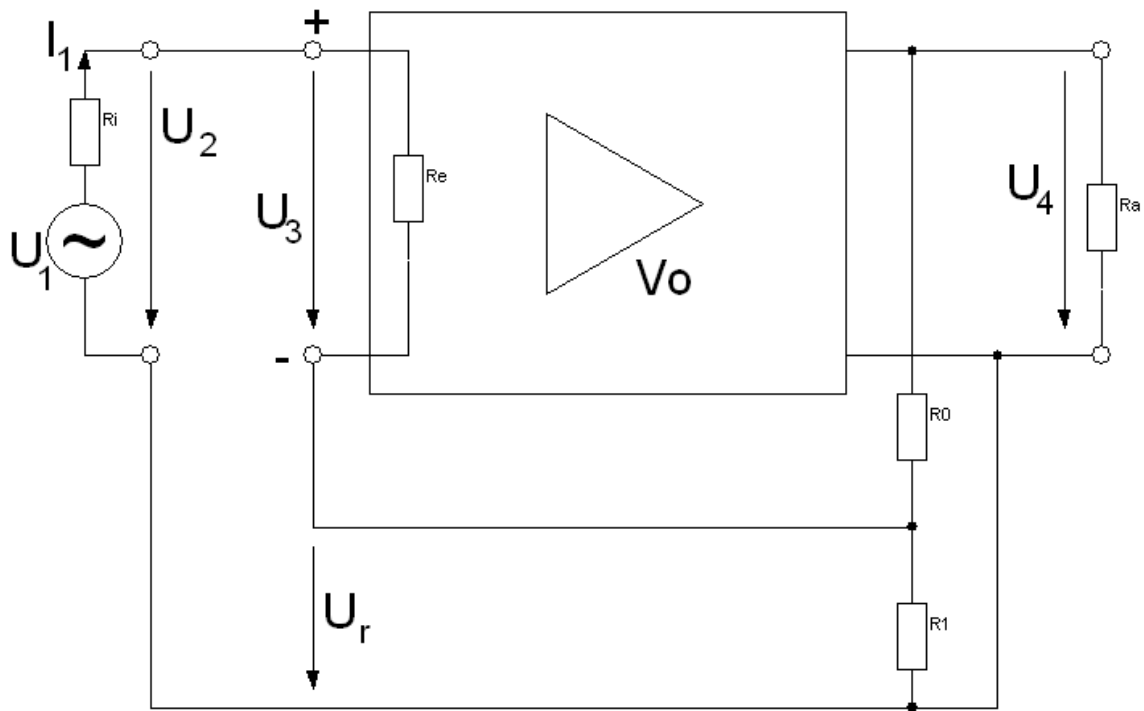


Abbildung 7: Der Verstärker hat einen weiteren Eingang bekommen

Nun wird Abbildung 7 so umgezeichnet, dass ein Schaltsymbol eines Operationsverstärkers verwendet wird.

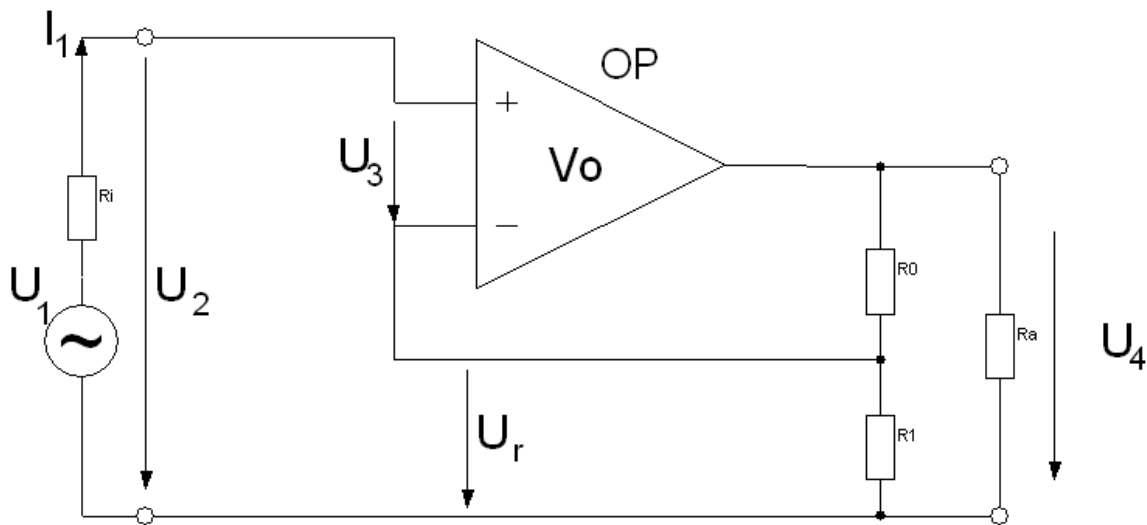


Abbildung 8: Der nicht invertierende Operationsverstärker

5 Der nicht invertierende Verstärker

Die Beschaltung des nicht invertierenden Verstärkers nennt man auch potenziometrisch, da der Gegenkopplungsvierpol aus einem Spannungsteiler, einem Potenziometer, besteht.

Das Signal der Quelle U_1 wird dem „+“-Eingang des Operationsverstärkers zugeführt. D.h. das Eingangssignal erfährt keine Invertierung. Die Spannung U_r wird am „-“-Eingang angeschlossen. Dieses Signal erfährt somit eine Invertierung. Damit ist die Bedingung aus (2) erfüllt.

Wie bestimmen R_0 und R_1 die geschlossene Schleifenverstärkung? R_0 und R_1 bilden einen Spannungsteiler. Die Formel dafür lautet:

$$\frac{U_r}{U_4} = k = \frac{R_1}{R_1 + R_0} \quad (8)$$

In (6) eingesetzt ergibt sich für die geschlossene Schleifenverstärkung V für den nicht invertierenden Operationsverstärker.

$$V = \frac{1}{\frac{R_1}{R_1 + R_0} + \frac{1}{V_0}} \quad (9)$$

Auch im Fall der Formel (9) gilt die Vereinfachung wie bei Formel (7). Geht V_0 gegen unendlich, ist also sehr, sehr groß⁵, wird der entsprechende Term praktisch 0 und fällt damit weg.

Für ein sehr groß V_0 gilt:

$$V = \frac{1}{\frac{R_1}{R_1 + R_0}} \quad (10)$$

und nach Auflösung des Doppelbruchstrichs:

$$V = \frac{R_1 + R_0}{R_1} \quad (11)$$

und Ausklammern von R_1 :

$$V = 1 + \frac{R_0}{R_1} \quad (12)$$

Beim nicht invertierenden Operationsverstärker haben wir eine Spannungsgegenkopplung, da das Gegenkopplungssignal aus einer Spannung abgeleitet wird.

5.1 Der Eingangswiderstand beim nicht invertierenden Operationsverstärker

Der Eingangswiderstand des idealen Operationsverstärkers soll möglichst gegen Unendlich gehen. Damit wird die vorangehende Stufe, z.B. eine Signalquelle, praktisch nicht belastet und deren Klemmenspannung entspricht der Quellspannung U_0 . Dieser sehr hohe Eingangswiderstand zwischen dem „+“- und „-“-Eingang wird bei dieser Beschaltung noch um R_1 erhöht, denn R_1 und R_e liegen in Reihe. Damit ist der Eingangs-

⁵ Was eine sehr große Leerlaufverstärkung bedeutet wird auf Seite 33 erläutert.

widerstand des nicht invertierenden Operationsverstärkers mindestens so groß wie der Eingangswiderstand des Bauteils selbst. Dieser Wert lässt sich dem Datenblatt entnehmen.

6 Der invertierende Verstärker

Beim invertierenden Operationsverstärker wird das Eingangssignal auf den „-“-Eingang geführt. Steigt das Eingangssignal an, wird das Ausgangssignal kleiner. Damit entfällt aber der „-“-Eingang zur Invertierung des Gegenkopplungssignal. Abbildung 9 zeigt einen invertierenden Operationsverstärker. Hier wird die Gegenkopplung nicht über einen Spannungs- sondern einem Stromteiler realisiert. Für die Ermittlung der geschlossenen Schleifenverstärkung wird angenommen, dass der Strom in den „-“-Eingang vernachlässigbar klein ist. Damit gilt:

$$I_1 = I_0 = I \quad (101)$$

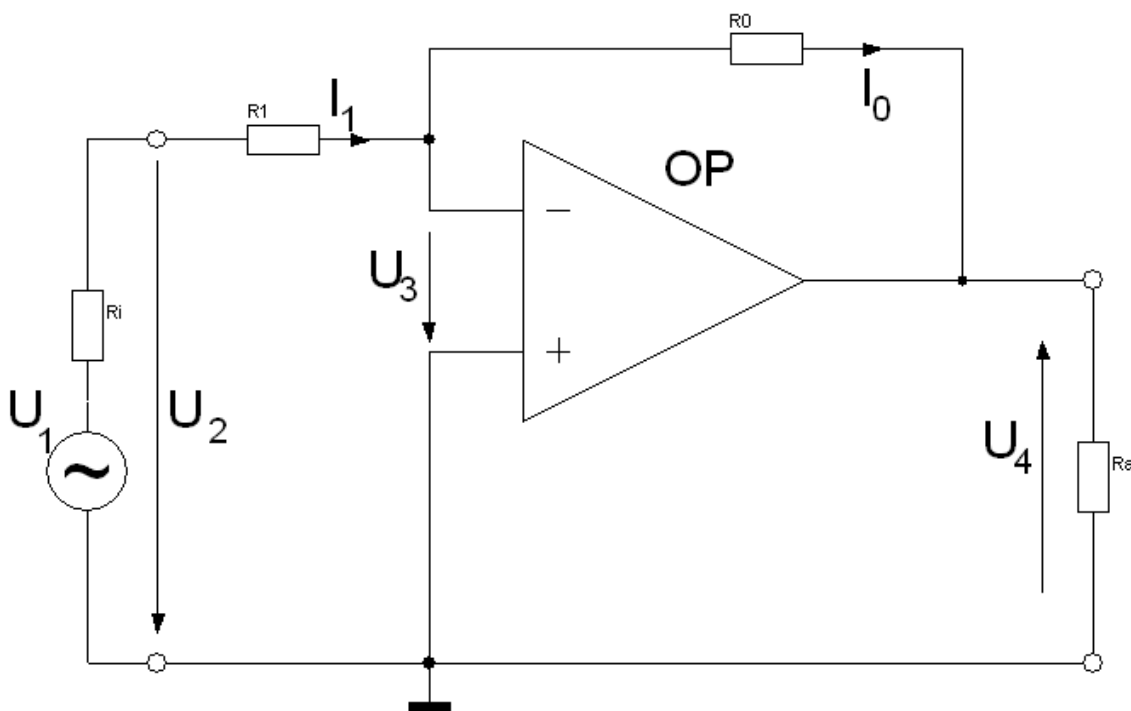


Abbildung 9: Der invertierende Operationsverstärker

Weiterhin gilt analog zu (5):

$$V = - \frac{U_4}{U_2} \quad (102)$$

Das Negativzeichen kommt vom invertierenden Verhalten der Schaltung. Für die offene Schleifenverstärkung (Leerlaufverstärkung) gilt:

$$V_0 = - \frac{U_4}{U_3} \quad (103)$$

Nach der Knoten- und Maschenregel gilt:

$$-U_4 = U_3 - R_0 \cdot I \quad (104)$$

und

$$U_2 = U_3 + R_1 \cdot I \quad (105)$$

Setzt man (104) und (105) in (102) ein, ergibt sich:

$$V = \frac{U_3 - R_0 \cdot I}{U_3 + R_1 \cdot I} \quad (106)$$

Stellt man (103) nach U_3 um, bekommt man:

$$U_3 = - \frac{U_4}{V_0} \quad (107)$$

Setzt man (107) in (106) ein:

$$V = \frac{- \frac{U_4}{V_0} - R_0 \cdot I}{- \frac{U_4}{V_0} + R_1 \cdot I} \quad (108)$$

Lässt man nun V_0 wieder gegen Unendlich gehen, ergibt sich ein V von:

$$V = \frac{-R_0 \cdot I}{R_1 \cdot I} \quad (109)$$

Der Strom I kürzt sich heraus. Damit wird V :

$$V = \frac{1}{k} = - \frac{R_0}{R_1} \quad (110)$$

Der Gegenkopplungsfaktor k berechnet sich somit:

$$k = - \frac{R_1}{R_0} \quad (111)$$

6.1 Der Eingangswiderstand des invertierenden Operationsverstärkers

Der Eingangswiderstand des Bauteils zwischen dem „+“- und „-“-Eingang ist weiterhin sehr, sehr groß. Da aber die Spannung U_3 ebenfalls sehr, sehr klein ist (mit ca. 5 μ Volt bis 50 μ Volt geht sie praktisch gegen 0 Volt) liegt der „-“-Eingang auf praktisch dem gleichen Potenzial wie der „+“-Eingang. Der „+“-Eingang liegt aber auf Massepotenzial was damit faktisch auch für den „-“-Eingang gilt. Damit liegt der rechte Anschluss von R_1 ebenfalls auf Massepotenzial und die Spannungsquelle U_1 mit der Reihenschaltung aus R_i und R_1 belastet. R_1 ist der Eingangswiderstand der Gesamtschaltung. Dies ist wichtig, weil man so eine eventuell notwendige Anpassung⁶ sehr leicht realisieren kann.

In diesem Fall spricht man von der virtuellen Masse, die am - Eingang anliegt.

6 Was ist Anpassung? Erläuterungen dazu im Anhang auf Seite 34 .

7 Betriebsspannung am Operationsverstärker

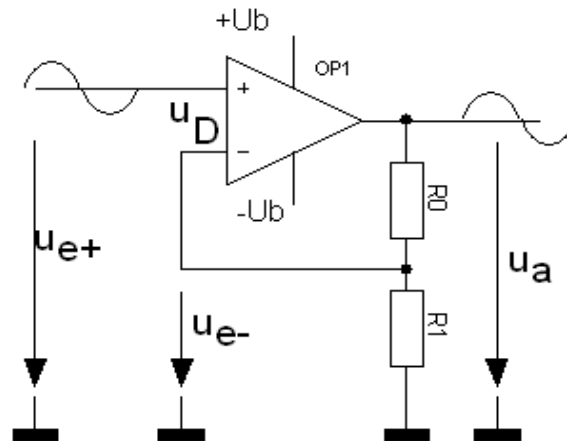


Abbildung 10: Nicht invertierender Signalverstärker

Das Eingangssignal wird mit dem Verstärkungsfaktor $v = 1 + \frac{R_0}{R_1}$ verstärkt. Das Eingangs- und Ausgangssignal sind gleichphasig.

Im Vergleich zu einem Transistorverstärker fallen die fehlenden Kondensatoren am Eingang und Ausgang auf. Dort waren diese notwendig, um den Signalstromkreis vom Ruhestromkreis zu trennen. Der Nachteil dort ist vor allem das Hochpassverhalten. Damit ist es unmöglich eine Gleichspannung zu verstärken.

Ganz anders hier: Ist das Eingangssignal positiv, ist auch das verstärkte Ausgangssignal positiv. Bei einem negativen Eingangssignal ist das verstärkte Ausgangssignal auch negativ. Dabei ist egal, ob es sich um eine zeitlich veränderliches Signal oder um ein Gleichspannungssignal handelt.

Der Übergang von einer positiven zu einer negativen Ausgangsspannung erfolgt nahtlos, ohne einen Sprung oder eine Stufe.

Um diese zu erreichen, muss der Operationsverstärker mit einer sogenannten bipolaren Spannungsquelle versorgt werden. Sie besteht im Prinzip aus zwei Spannungsquellen mit einem Mittelabgriff. Die beiden einzelnen Spannungen müssen nicht unbedingt gleich groß sein. Das schränkt allerdings die mögliche symmetrische Aussteuerung ein.

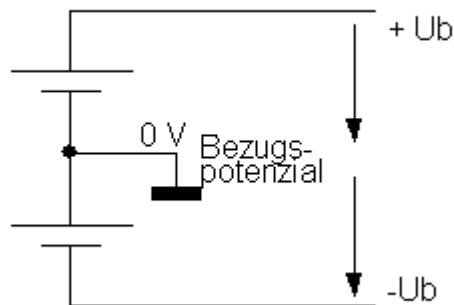


Abbildung 11: Bipolare Spannungsversorgung

Das Bezugspotenzial ist sowohl für das Eingangssignal als auch das Ausgangssignal wichtig. Auf dieses Potenzial beziehen sich alle Messungen.

8 Lineare Anwendungen mit Operationsverstärker

8.1 Spannungsfolger (Impedanzwandler)

In der Praxis kommt es oft vor, dass eine Signalquelle einen sehr hohen Innenwiderstand besitzt und somit kaum belastet werden darf. Der endliche Widerstand vieler Signalverstärker würde eine zu große Belastung darstellen und für ein Zusammenbrechen der Klemmenspannung sorgen.

Dieser Spannungsfolger nutzt den sehr hohen Eingangswiderstand des Operationsverstärkers aus um die Signalquelle möglichst wenig zu belasten. Die Verstärkung hat den Wert 1. Somit ist die Ausgangsspannung

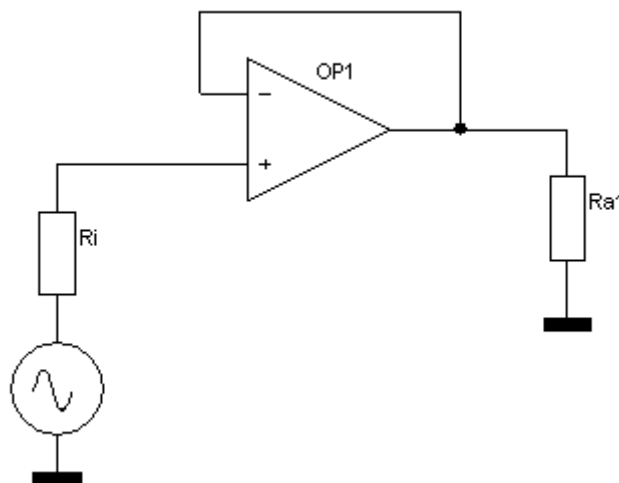


Abbildung 12: Spannungsfolger bzw. Impedanzwandler

genauso groß die die Eingangsspannung.

8.2 Strom- / Spannungswandler

Oft liegen die Messgrößen nicht als Spannungs- sondern als Stromwerte vor. Damit die nachfolgende Auswerteelektronik aber dennoch ein passendes Spannungssignal bekommt, muss der Strom in eine Spannung umgesetzt werden. Dazu dient die Schaltung in Abbildung 13. Eine Stromquelle liefert den Strom I . Wegen des virtuellen Massepunktes am – Eingang erzeugt dieser Strom I am Widerstand R_0 die Spannung U_0 .

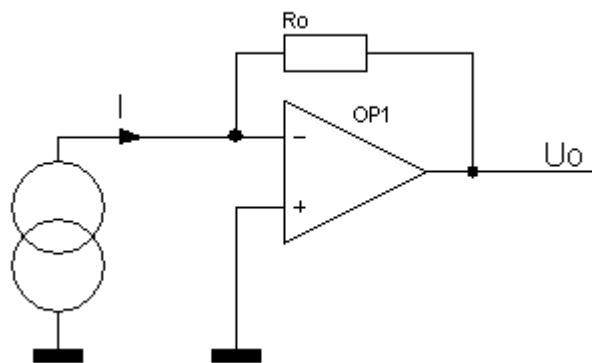


Abbildung 13: Strom- / Spannungswandler

8.3 Summierverstärker

Ein solcher Verstärker wird z.B. für Mischpulte eingesetzt. Dort werden zwei oder mehrere Signale zusammengeführt.

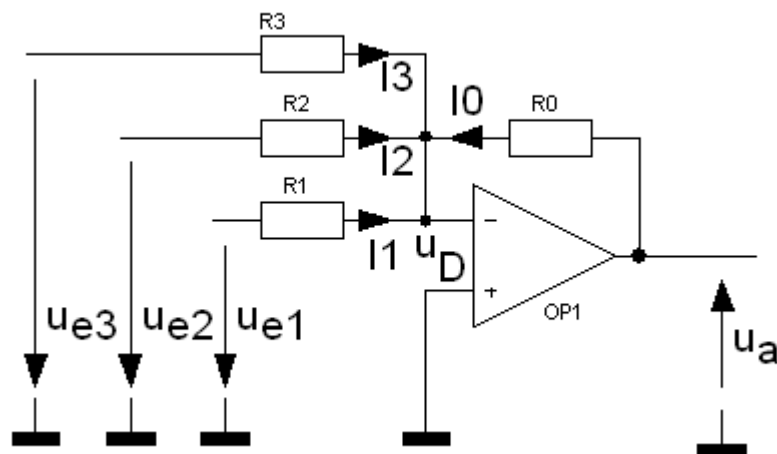


Abbildung 14: Der Summierverstärker

Das Ganze funktioniert aber nur mit dem invertierenden Verstärker, da hier die virtuelle Masse notwendig ist.

Die Eingangsspannungen U_{e1} , U_{e2} und U_{e3} erzeugen durch die Widerstände R_1 , R_2 und R_3 die Ströme I_1 , I_2 und I_3 . Dabei berechnet sich der jeweilige Strom nach der Formel:

$$I_x = \frac{U_{e_x}}{R_x}$$

weil der rechte Anschluss des jeweiligen Widerstandes am - Eingang des OPs liegt. Dieser liegt aber wegen $U_D \approx 0$ auf dem Potenzial des + - Eingangs und damit auf Massepotenzial.

Ohne Operationsverstärker ergäbe die Addition zweier Signalspannungen die Schaltung in Abbildung 15 rechtes Bild. Das ist aber, etwas umge-

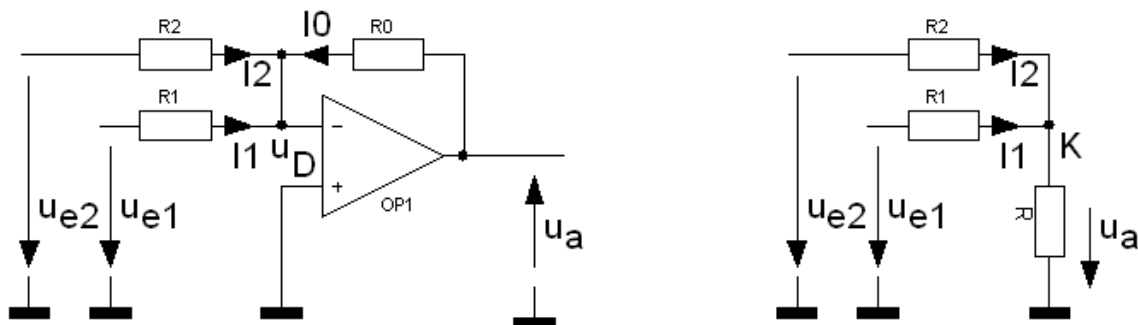


Abbildung 15: Signaladdition mit und ohne Operationsverstärker

zeichnet die Schaltung in Abbildung 16. Bei dieser Überlagerung⁷ sind die Ströme durch die einzelnen Widerstände sowohl von U1 als auch von U2

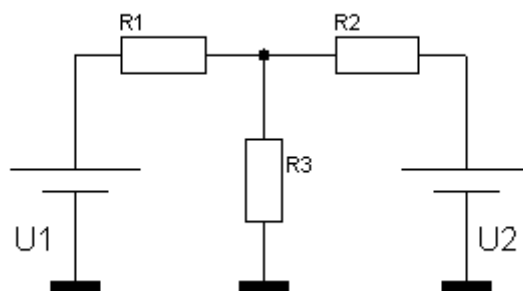


Abbildung 16: Klassische Überlagerung

abhängig. D.h. Die Spannungsquelle beeinflussen sich gegenseitig. Die einzelnen Ströme lassen sich durch LGS bestimmen. Das *Wie*, ist Gegenstand eines eigenen Themenblattes.

⁷ Dies wird auch als Superposition bezeichnet.

8.4 Differenzverstärker

Diese Schaltung subtrahiert von U2 die Spannung U1. Die Verstärkung berechnet sich wie folgt:

$$v = \frac{2 R_0}{2 R_1} = \frac{R_0}{R_1}$$

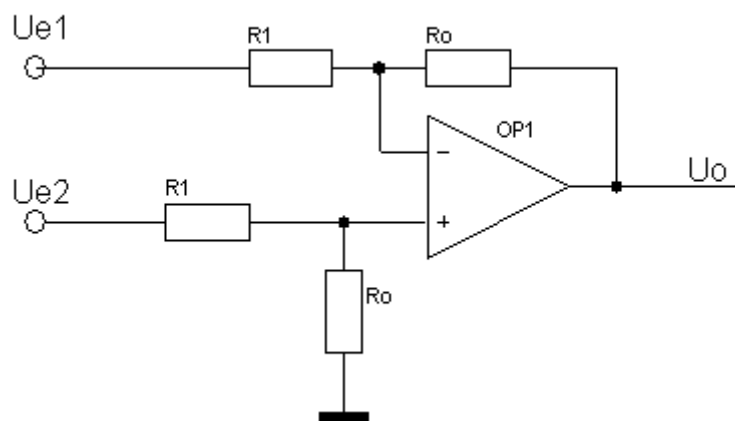


Abbildung 17: Differenzverstärker

8.5 Leitungstreiber

Auch in der Digitaltechnik werden Signale über weite Strecken transportiert. Dabei entstehen Verluste, die dafür sorgen, dass am Leitungsende nur noch ein Teil der eingespeisten Spannung ankommt. Bei sehr niedrigen Pegel besteht das Problem, dass man nicht mehr zwischen High und Low sauber unterscheiden kann. Daher werden oft keine zur Masse bezogenen Spannungen verwendet sondern man wertet die Polarität der Signale zueinander aus. Man spricht dann von differentiellen Signalen. Auf diese Weise kann man am Ende der Leitung Spannungen und damit die Informationen mit wenigen mV noch richtig erkennen. Das macht die Schaltung in Abbildung 18. Um Störungen, z.B. durch magnetische Felder, auf die Leitungen zu minimieren, werden die beiden Drähte verdreht. Zusätzliche Schirmung mittels eines Metallgeflechts erhöhen die Kabelqualität zusätzlich.

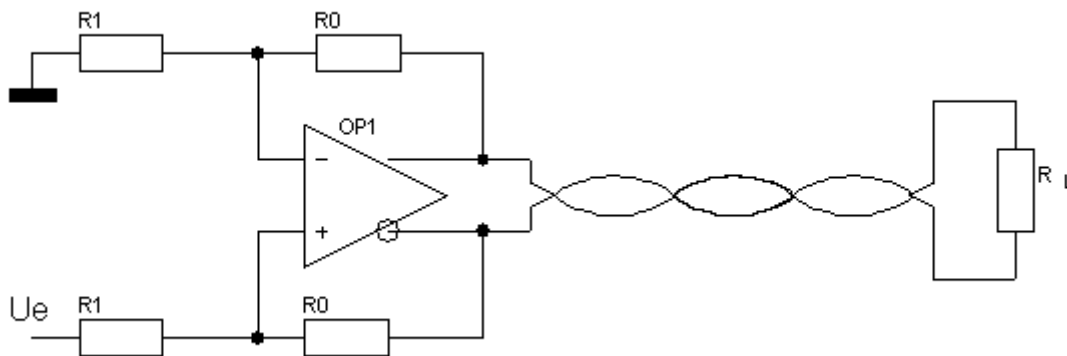


Abbildung 18: Leitungstreiber für "twisted pair"-Leitungen

8.6 Konstantstromquelle mit schwimmender Last

In der Praxis werden oft sogenannte Stromschleifen verwendet. Hier wird die Information mittels der Stromstärke übertragen. Diese Art der Signalübertragung hat den Vorteil, dass sich Leitungsunterbrechungen leicht erkennen lassen. Bei einer 4 – 20 mA – Stromschleife fließt ein Mindeststrom von 4 mA. Wird dieser unterschritten liegt ein Fehler in der Leitung vor.

Ein weiterer Vorteil ist die Tatsache, dass Stromschleifen weit weniger störanfällig sind als spannungsbasierte Medien.

Die Schaltung in hat den Nachteil – das kann aber auch manchmal ein Vorteil sein –, dass die Last Z_L nicht gegen Masse getrieben wird.

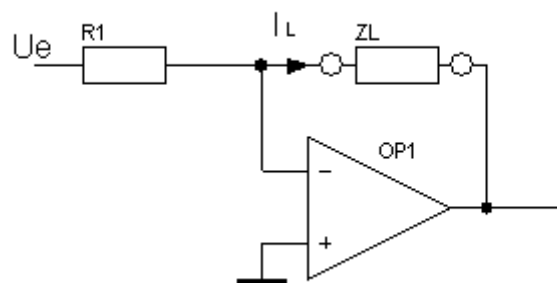


Abbildung 19: Konstantstromquelle mit schwimmender Last

Der Strom lässt sich nach folgender Gleichung berechnen:

$$I_L = \frac{U_e}{R_1}$$

8.7 Konstantstromquelle mit Last gegen Masse

Benötigt man eine Konstantstromquelle bei der die Last Z_L mit Masse verbunden ist, muss man die Schaltung in Abbildung 20 aufbauen.

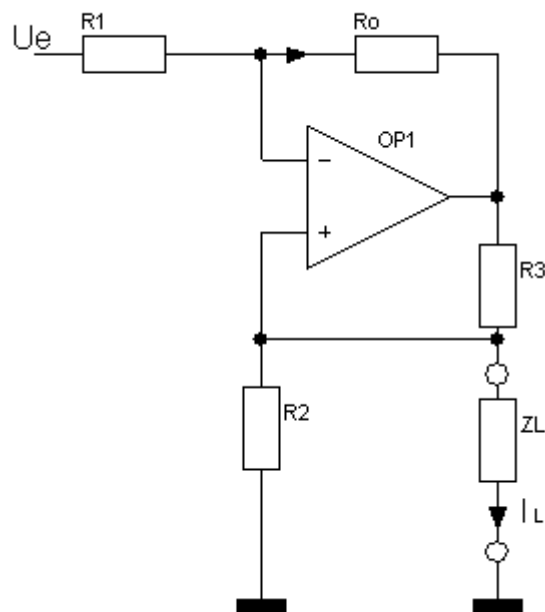


Abbildung 20: Konstantstromquelle mit er Last an Masse

Wenn folgendes gilt:

$$\frac{R_3}{R_2} = \frac{R_0}{R_1}$$

dann ist

$$I_L = -\frac{U_e}{R_2}$$

wobei R_1 und R_2 möglichst hoch und R_0 und R_3 möglichst niedrig sein sollten.

8.8 Integrator

Ein Integrator bildet aus dem Eingangssignal das Integral. Dazu wird ein Tiefpass um den Operationsverstärker erweitert.

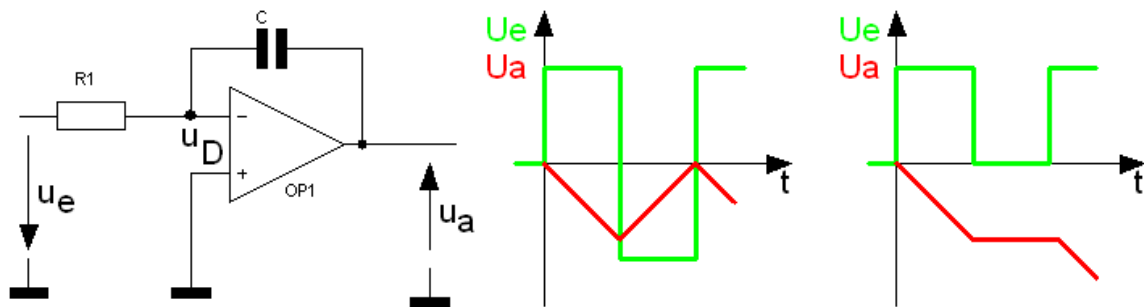


Abbildung 21: Der Integrator

Allgemein gilt:

$$u_a = \int_0^t u_e dt$$

Die Spannungsquelle U_e liefert zu jedem Zeitpunkt einen Strom i durch den Widerstand R_1 . Dieser Strom muss auch über C fließen.

Der exakte Strom berechnet sich:

$$i = \frac{u_e - u_D}{R}$$

Somit ergibt sich:

$$u_e - u_D = \frac{1}{C} \int_0^t i dt = \frac{1}{RC} \int_0^t (u_e - u_D) dt$$

u_D ist aber:

$$u_D = -\frac{u_0}{V_0}$$

Wenn V_0 sehr groß ist, dann geht u_D gegen 0 und kann i.d.R. vernachlässigt werden. Damit vereinfacht sich die Gleichung zu:

$$u_a = \frac{1}{RC} \int_0^t u_e dt$$

8.9 Differentiator

Im einfachsten Fall ist ein solcher Differentiator ein Hochpass. Auch hier wird durch einen Operationsverstärker das Verhalten deutlich verbessert.

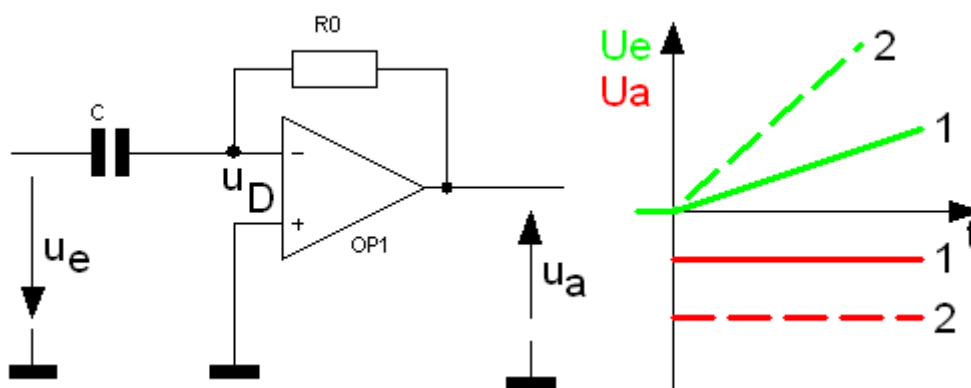


Abbildung 22: Der Differentiator

Solche Schaltungen werden z.B. dann gebraucht, wenn die zeitliche Veränderung der Spannung ausgewertet werden muss.

$$u_a = -RC \frac{du_e}{dt}$$

Je schneller sich ein Signal pro Zeiteinheit ändert, desto höher ist die Ausgangsspannung.

Ein Beispiel sind Beschleunigungssensoren. Wird ein Fahrzeug normal beschleunigt (grüne Kennlinie 1) ist die Ausgangsspannung (rote Kennlinie 1) vergleichsweise niedrig. Wird jedoch das Fahrzeug durch einen Unfall stark beschleunigt oder abgebremst ergibt sich eine Eingangsspannung wie bei der grünen Kennlinie 2. Nun ist auch die Amplitude der roten Kennlinie 2 deutlich größer.

9 Nichtlineare Anwendungen mit Operationsverstärker

9.1 Einweggleichrichter

Werden Gleichrichter für Messschaltungen eingesetzt, so haben sie den Nachteil, dass die Gleichrichterwirkung erst ab einer Eingangsspannung von mehr als 0,7 V einsetzt. Sind die Eingangsspannung kleiner als diese Schwellenspannung, ist dieser Messaufbau ungeeignet. Abhilfe schafft z.B. der Einweggleichrichter in Abbildung 23.

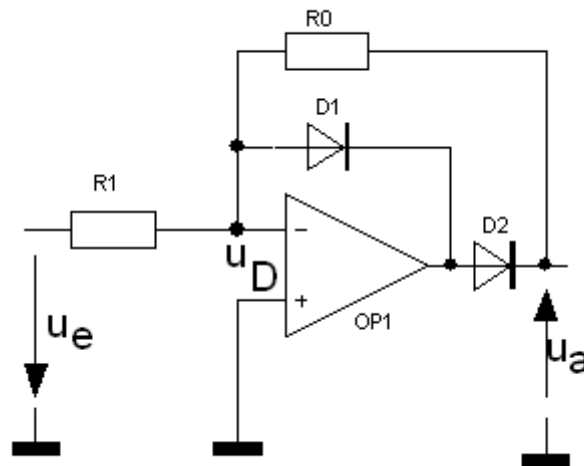


Abbildung 23: Einweggleichrichter

Die Diode D1 hat im unteren Bereich ($< 0,7V$) einen großen Widerstand. Damit wird die geschlossene Schleifenverstärkung abhängig von diesem Wert. Der Wert hängt aber von der Eingangsspannung u_e ab. Je kleiner sie ist, desto größer ist der Widerstand der Diode und desto größer ist die Gesamtverstärkung. Das geht theoretisch so weit, dass die Kennlinie ab der Eingangsspannung von

$$u_e = \frac{0,7V}{V_0}$$

bereits gerade verläuft. Bei einem V_0 von 100 dB wäre das bei einer Eingangsspannung von ca $7 \mu V$ (nur theoretischer Wert) der Fall. In Abbildung 24 erkennt man diesen Zusammenhang sehr deutlich.

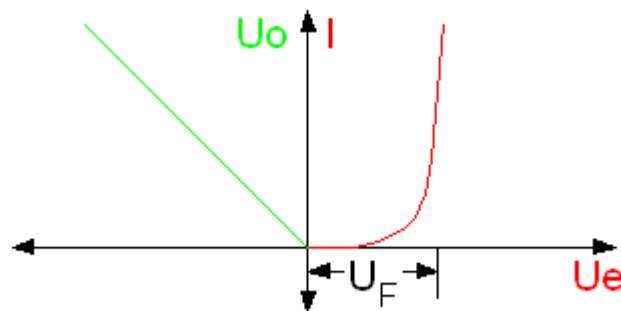


Abbildung 24: Einweggleichrichter und Diodenkennlinie

Die Schaltung in Abbildung 23 arbeitet mit negativen Eingangsspannungen und liefert am Ausgang positive Spannungen.

9.2 Zweiweggleichrichter

Will man sowohl negative als auch positive Eingangsspannungen verarbeiten, benötigt man einen Zweiweggleichrichter. Die Übertragungsfunktion einer solchen Schaltung sieht wie folgt aus:

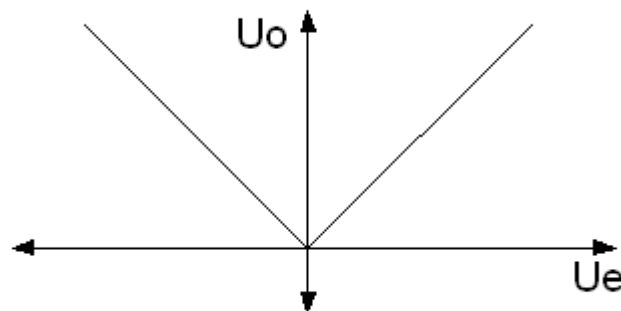


Abbildung 25: Übertragungsfunktion des Doppelgleichrichters

9.3 Logarithmierer

Beim Logarithmierer nutzt man den exponentiellen Zusammenhang zwischen dem Durchlassstrom und der Durchlassspannung einer Diode aus. Die Näherungsformel nach Shockley lautet:

$$I_D = I_s(T) \left(e^{\frac{U_F}{n \cdot U_T}} - 1 \right)$$

$I_s(T)$ ist der Sättigungssperrstrom: Er beträgt ca. 10^{-12} A bis 10^{-6} A
 der Emissionskoeffizient n liegt zwischen 1 und 2
 die Temperaturspannung U_T beträgt bei 20°C ca. 25 mV

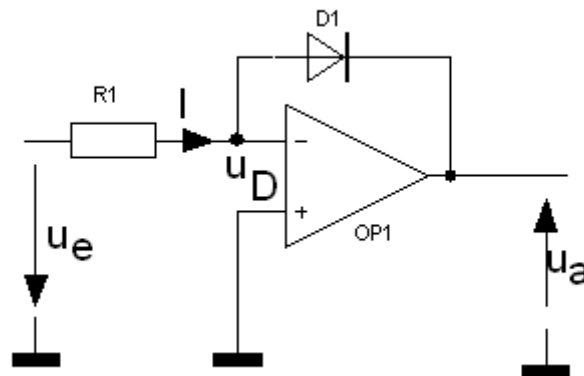


Abbildung 26: Einfacher Logarithmierer

10 Digitale Anwendungen von Operationsverstärkern

10.1 Komparator

Ein Komparator vergleicht zwei analoge Größen und zeigt das Ergebnis als digitaler Wert (High oder Low) an. Soll der Operationsverstärker als

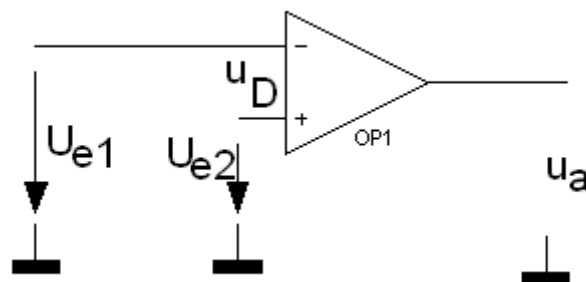


Abbildung 27: Spannungskomparator

Komparator arbeiten, entfällt die Gegenkopplung. Somit werden die beiden Eingangsspannung U_{e1} und U_{e2} mit V_0 verstärkt.

Ist die Spannung U_{e2} etwas größer als U_{e1} , dann wird der Ausgang positiv (= max. Spannung i.d.R. die positive Betriebsspannung). Da die Spannung U_D mit V_0 verstärkt wird, lässt sich ermitteln, wie groß U_D mindestens sein muss, damit die Ausgangsspannung auch den maximalen Wert erreicht.

Beispiel:

Bei einem V_0 von 100 dB ($\equiv 100\,000$) muss U_D mindestens

$$\frac{10V}{10000} = 1 \cdot 10^{-4} V = 0,1 mV$$

sein.

Wird dieser Wert unterschritten, ist die Ausgangsspannung analog im Bereich – Betriebsspannung bis + Betriebsspannung.

10.2 Schmitt-Trigger

Schmitt-Trigger sind Schwellwertschalter. Wobei die Einschaltsschwelle einen anderen Wert als die Ausschaltsschwelle hat.

Beispiel:

Ein Dämmerungsschalter soll nur dann das Licht ein- bzw. ausschalten, wenn es die entsprechende Gesamthelligkeit. Ein vorbeifahrendes Auto

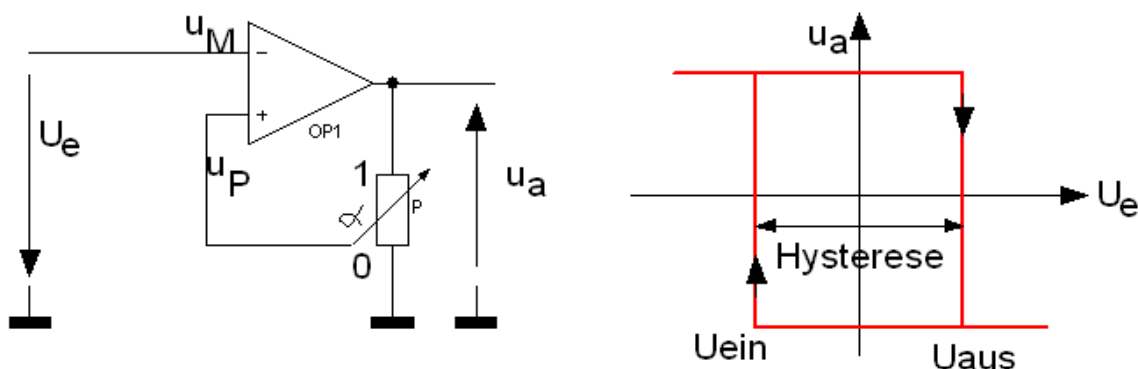


Abbildung 28: Einfacher Schmitt-Trigger und Hysteresekurve

darf dabei keinen Einfluss haben. Bleiben die Schwankungen kleiner als die Hysterese, schaltet der Schmitt-Trigger nicht. In Abbildung 29 entspricht U_e der Stärke des Tageslicht und U_a der Beleuchtung.

Abbildung 29 zeigt solch einen Dämmerungsschalter.

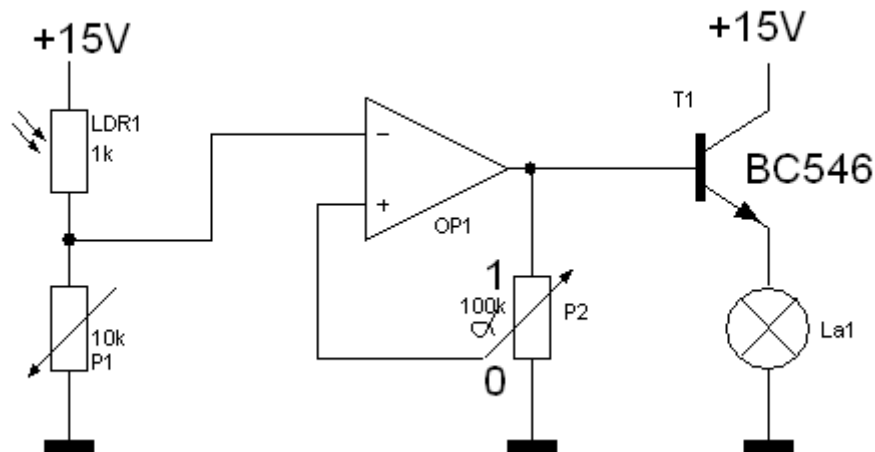


Abbildung 29: Dämmerungsschalter

Eine andere Anwendung ist die Umwandlung eines Dreiecksignals in ein Rechtecksignal.

In Abbildung 28 lässt sich die Hysterese mittels dem Potenziometer P einstellen. Es bildet einen Spannungsteiler. Die Rückkopplung ist in diesem Fall als Mitkopplung ausgelegt. Angenommen die Ausgangsspannung sei positiv, dann ist auch die zum + Eingang zurückgeführte Spannung U_e positiv. Die Höhe der Spannung hängt von der Schleiferstellung α ab.

$$U_P = U_{MAX} * \alpha$$

Solange $U_N < U_P$ ist, bleibt der Verstärkerausgang positiv. Erreicht die Eingangsspannung U_e den Wert von U_P , dann kippt der Schmitt-Trigger und der Ausgang U_a wird negativ. Nun wird aber über die Rückkopplung U_P negativ. Erst wenn U_e den Wert $-U_{MAX} * \alpha$ erreicht, springt die Ausgangsspannung wieder auf den positiven Maximalwert.

Die Hysteresespannung U_H berechnet sich wie folgt:

$$U_H = 2 * U_{MAX} * \alpha$$

In Abbildung 30 ist das Schaltverhalten in Abhängigkeit der beiden Schaltschwellen dargestellt. Die Höhe der Schaltschwelle und damit die Weite der Hysterese wird über das Potenziometer eingestellt.

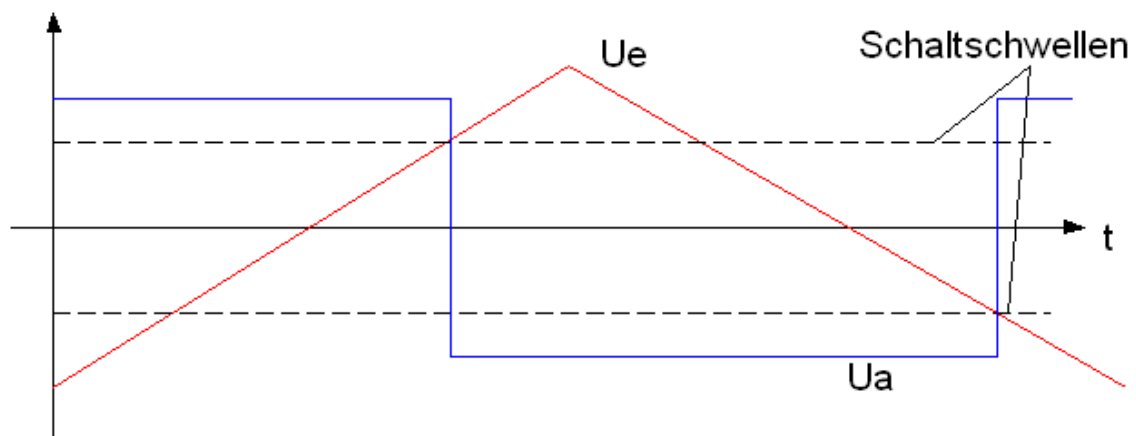


Abbildung 30: Das Schaltverhalten eines Schmitt-Triggers

10.3 Astabiler Multivibrator

Ein astabiler Multivibrator erzeugt Rechteckspannungen. Dabei wird ein Kondensator ge- und entladen. Ein Schmitt-Trigger schaltet bei den jeweiligen Spannungswerten am Kondensator um. In Abbildung 31 ist ein solcher Multivibrator dargestellt.

Angenommen der Ausgang liefert eine positive Spannung, dann wird der Kondensator über den Widerstand geladen. Erreicht diese Spannung den Wert, der mit dem Potenziometer eingestellt ist, kippt der Ausgang und wird negativ. Dadurch entlädt sich der Kondensator bzw. wird mit einer negativen Spannung geladen. Sobald diese Spannung den Wert am Potenziometer erreicht, springt der Ausgang wieder ins positive.

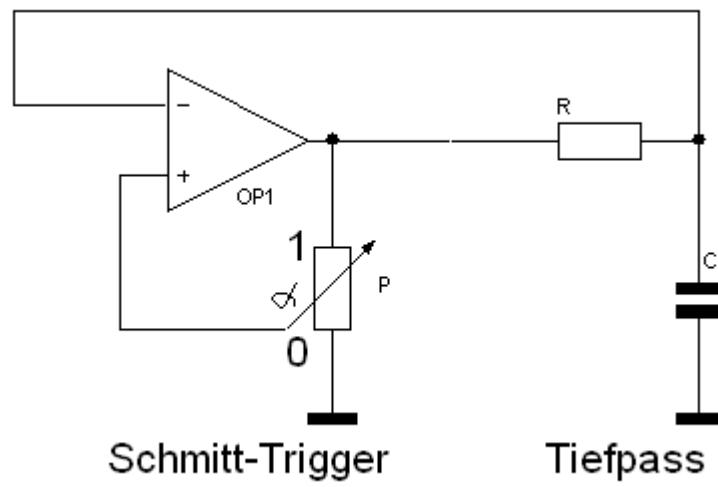


Abbildung 31: Astabiler Multivibrator

11 Anhang

11.1 Was bedeutet „sehr große Leerlaufverstärkung“?

Beim idealen Verstärker war die Idee, die Verstärkung so groß zu machen, dass sie in der Praxis nie voll genutzt werden kann. Statt dessen wird durch eine Gegenkopplung die Gesamtverstärkung auf das gewünschte Maß reduziert.

In der Praxis sind Verstärkungen zwischen 1 und 200 oder 300 die Regel. Braucht man mehr, werden zwei Verstärker hintereinander geschaltet. Weiterhin gilt in der Praxis folgendes: Ist ein Term um den Faktor 100 oder 1000 größer als der Rest, dann darf man in meist vernachlässigen. Das liegt einfach daran, dass der Unterschied den dieser Term macht messtechnisch nicht oder kaum erfasst werden kann.

Geht man auf „Nummer Sicher“ nimmt man eine mögliche Verstärkung von z.B. 1000 an. Lässt dann auch nur die Terme weg, deren Einfluss unter einem Tausendstel liegt, dann bekommt man eine Verstärkung V_X die der Operationsverstärker mindestens haben muss, von:

$$V_X = 1000 \cdot 1000 = 1000000 = 1 \cdot 10^6$$

Das ist eine Verstärkung von einer Million. Würde man den Term bereits bei einem Faktor von 100 vernachlässigen, wäre die notwendige Verstärkung Hunderttausend.

Moderne Operationsverstärker erreichen problemlos Leerlaufverstärkungen von 10^4 bis 10^7 . Im Fall einer Leerlaufverstärkung von 10^4 müsste man auch die geschlossene Schleifenverstärkung von 1000 auf 100 reduzieren. Das zeigt, dass sehr wohl bei der Auswahl des Operationsverstärkers darauf geachtet werden muss, wie groß die gewünschte Verstärkung (geschlossene Schleifenverstärkung) sein soll.

11.2 Was ist Anpassung?

Werden hochfrequente Signale über Leitungen geführt muss man darauf achten, dass keine Reflexionen entstehen. Veranschaulichen lässt sich dies indem man einzelne Impulse betrachtet. Ein Impulsgenerator erzeugt einen Spannungsimpuls, indem eine Spannungsquelle für eine kurze, z.T. extrem kurze Zeit über einen Schalter an den Verbraucher angeschlossen wird. Solche Impulsgeneratoren erzeugen Spannungsimpulse mit einer Breite von 1 ms bis zu 10 ps (Pikosekunden). Ein solcher Spannungsimpuls ist nichts anderes als eine Ansammlung von Elektronen.

11.3 Offenes Leitungsende

Wird an eine Leitung ein solcher Impulsgenerator angeschlossen, mit dem man Impulse erzeugt kann, deren Impulsbreite kleiner ist als die Zeit, die der Impuls um von der einen Seite der Leitung auf die andere zu gelangen, dann ergibt sich Abbildung 32:

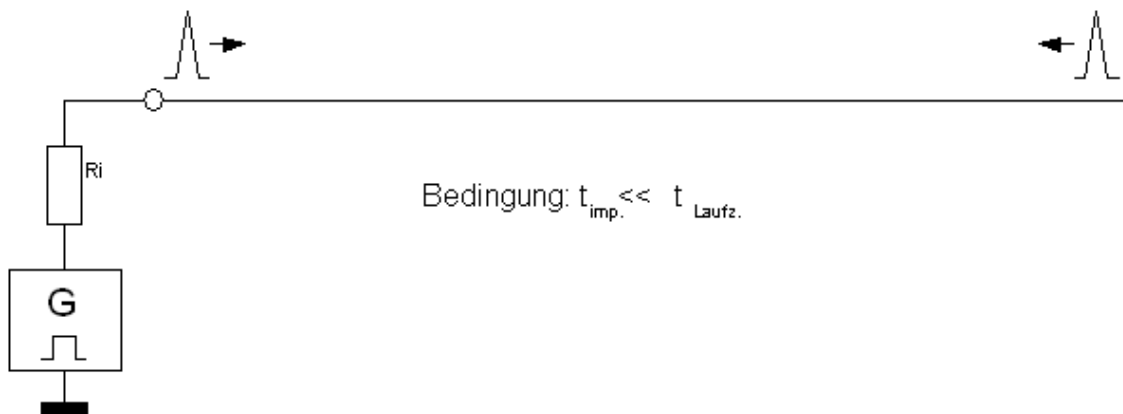


Abbildung 32: Signalreflexion am offenen Leitungsende

Der Impuls wandert vom Impulsgenerator in die Leitung und wandert dort zum anderen Ende. Vor und hinter dem Impuls sind keine Elektronen, die Leitung also an dieser Stelle spannungslos. Dieser Impuls wandert also wie eine Welle über die Leitung. Es sind ja nicht die Elektronen selbst die sich so schnell fortbewegen, nein nur deren Wirkung ist so schnell. Sie stoßen die Nachbarelektronen an, geben also ihre eigene Energie an die anderen ab, die nun ihrerseits die Energie an ihre Nachbarn weitergeben.

Sobald dieser Impuls am Ende der Leitung angekommen ist, stellt sich die Frage, wohin jetzt die Elektronen gehen sollen. Das Leitungsende ist offen und hat keinerlei Verbindung zu einem anderen Leiter. Die Elektronen häufen sich also am Ende an. Auf diese Weise entsteht eine Spannungsquelle, denn es herrscht an dieser Stelle der Leitung ein Elektronenüberschuss.

Diese Spannungsquelle kann aber ebenfalls, wie der Impulsgenerator, nur einen kurzen Impuls erzeugen, mehr Elektronen stehen ja nicht zur Verfügung. Also wandert der Impuls auf der Leitung wieder zurück. Man sagt, der Impuls wird am Leitungsende reflektiert. Er läuft in Richtung Generator und auch in diesen hinein, da ja dieses Leitungsende mit ihm verbunden ist. Hier muss der Impuls durch den Innenwiderstand des Generators hindurch. Fließt ein Strom (bewegte Ladungen) durch einen Widerstand, fällt an diesem eine Spannung ab. Da bei einem Wirkwiderstand (= ohmscher Widerstand) Strom multipliziert mit der Spannung eine Wirkleistung ergibt, wird die Energie des reflektierten Impulses hier in Wärmeenergie umgesetzt und geht somit dem System verloren.

11.4 Kurzgeschlossenes Leitungsende

Hier wird das reflektierte Signal invertiert.

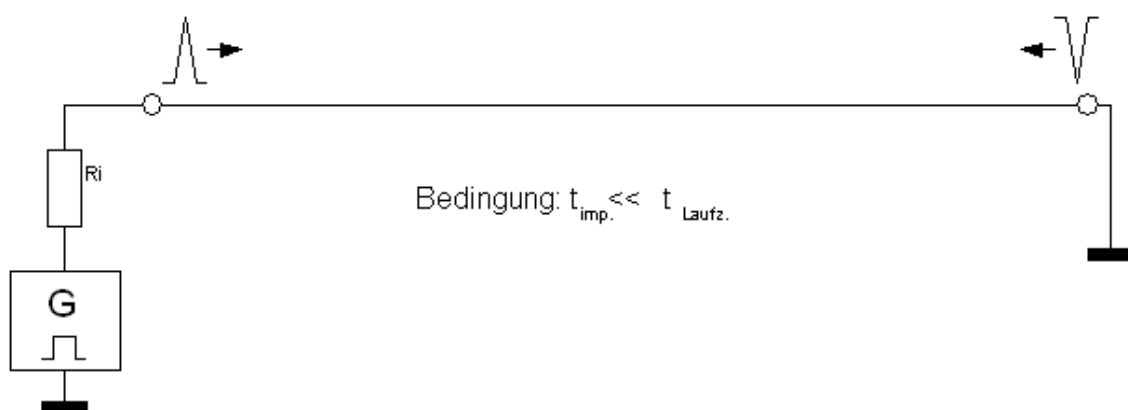


Abbildung 33: Reflexion an einer kurzgeschlossenen Leitung

Diese Signalinvertierung ist in der Art wie gemessen wird begründet. Da hier sehr wohl ein Rückweg für das Signal vorhanden ist, läuft der Impuls

auch über die Masse zum Generator zurück. Damit wird die Masse kurzzeitig positiver als die Signalleitung. Das Messgerät geht jedoch davon aus, dass die Masse das Bezugspotenzial ist. Hebt sich das Potenzial auf der Masse kurz an, so ist zu diesem Zeitpunkt die Signalleitung negativ gegenüber der Masse.

11.5 Anpassung

Hat der Generator den selben Innenwiderstand wie am anderen Ende der Empfänger und hat die Leitung dazwischen den selben Wellenwiderstand dann findet der Impuls kein Hindernis auf seinem Weg. Im Empfänger angekommen wird die gesamte Energie des Impulses in Wärme umgesetzt. Damit ist der Impuls verschwunden und es kann keine Reflexion stattfinden.

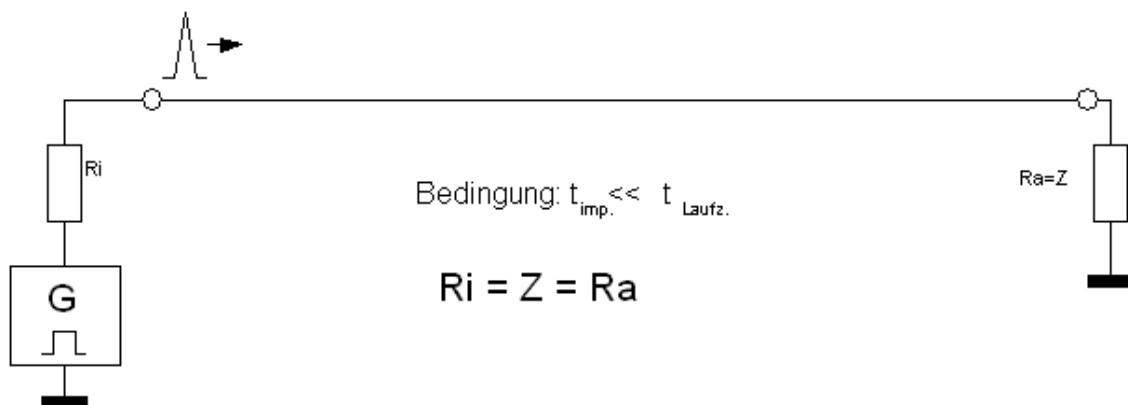


Abbildung 34: Richtig abgeschlossene (terminierte) Leitung

Wieviel der Energie reflektiert wird, hängt vom sogenannten Reflexionsfaktor ab.

Dieser berechnet sich wie folgt:

$$r = \frac{R_a - Z_L}{R_a + Z_L}$$