

III. Operationsverstärker

III.1

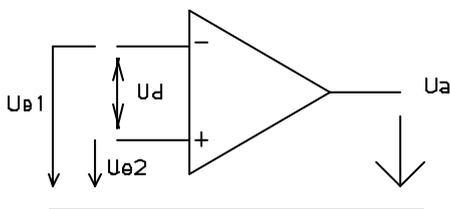
Anwendungen

Operationsverstärker werden als integrierte Schaltkreise hergestellt und finden vor allem Anwendung in der *analogen* Signalverarbeitung: als Regelverstärker in der Regelungstechnik, als Meßverstärker in der Meßtechnik und als Verstärkerelement in aktiven Filterschaltungen. In der Digitaltechnik werden Op's für Kippschaltungen, Schwellwertschalter und DigitalAnalog-Umsetzer verwendet.

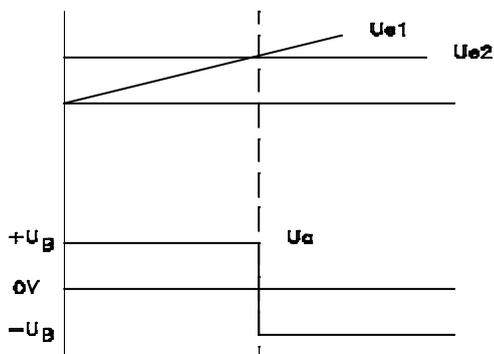
III.2

Eigenschaften

Mit Operationsverstärkern können sowohl Gleich- als auch Wechselspannungen verstärkt werden. Besondere Eigenschaften sind große Spannungs- und Leistungsverstärkung, sehr hoher Eingangswiderstand und kleiner Ausgangswiderstand. Operationsverstärker werden in der Regel mit einer positiven und einer negativen Betriebsspannung versorgt, die jedoch im Schaltsymbol nicht repräsentiert werden.



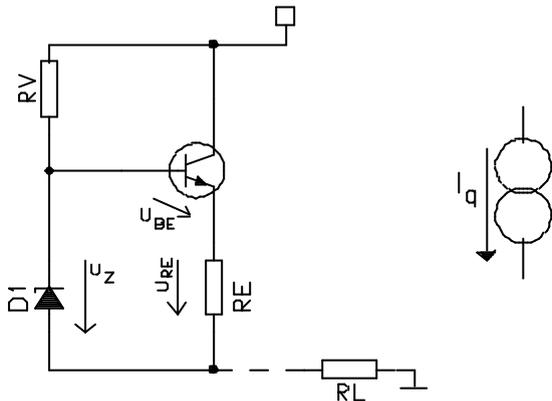
Der Operationsverstärker hat zwei Anschlüsse für eine *Differenzeingangsspannung* U_d und einen Anschluß für die Ausgangsspannung U_a . Die Anschlüsse für die Eingangsspannungen tragen die Bezeichnungen "invertierend" (-) und "nicht invertierend" (+).



Die Ausgangsspannung ist gegenüber der Differenzeingangsspannung invertiert, als "Merkregel" gilt: der Ausgang ist negativ, wenn die Spannung am invertierenden Eingang größer ist als am nicht invertierenden. Aufgrund der theoretisch unendlichen Verstärkung nimmt die Ausgangsspannung beim offenen Verstärker immer den vollen Betrag der Betriebsspannung an ($+U_B$ oder $-U_B$).

III.3 Schaltungsaufbau

Hierfür müssen zunächst einige andere Grundschaltungen erläutert werden. Als erstes ist das Verständnis einer Stromregelung erforderlich. Man bezeichnet diese Grundschaltung auch als Konstantstromquelle.



Wie man sieht, liegt zwischen der Basis des Transistors und dem Lastwiderstand R_L die Spannung U_Z , die durch die Zenerdiode konstant gehalten wird. Nach der Maschenregel ist

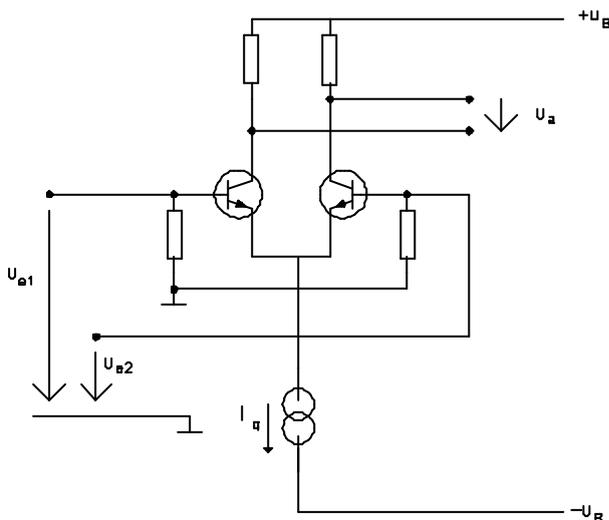
$$U_Z = U_{BE} + U_{RE}$$

und somit auch die Summe dieser beiden Spannungen konstant. Dies bedeutet wiederum einen konstanten, von der Größe des Lastwiderstandes unabhängigen Transistorstrom. Steigt infolge zu großen Laststroms der Spannungsabfall U_{RE} an, so wird der Transistor zugesteuert, ist dagegen der Laststrom zu gering, steigt die Spannung U_{BE} und gem. Kennlinie des Transistors fließt wieder ein größerer Strom.

Konstantstromquelle.

$$I_L = (U_Z - U_{BE}) / R_E$$

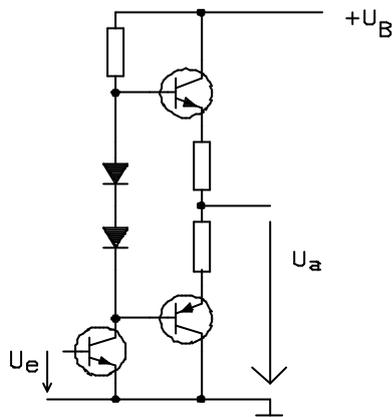
Mit Hilfe einer solchen Konstantstromquelle läßt sich eine sog. Differenzverstärkerstufe aufbauen: Die Stromquelle liegt hier im gemeinsamen Emittierzweig der beiden Verstärker (I_q).



Ist nun z.B. $U_{e1} > U_{e2}$, so wird der linke Transistor "mehr" leitend. Da aber die Summe beider Kollektorströme konstant ist, muß der Strom des rechten Transistors entsprechend abnehmen. Bei gleich großen Arbeitswiderständen ergibt sich daraus eine Ausgangsspannung U_a , die um ein vielfaches größer ist als die Differenz der Eingangsspannungen.

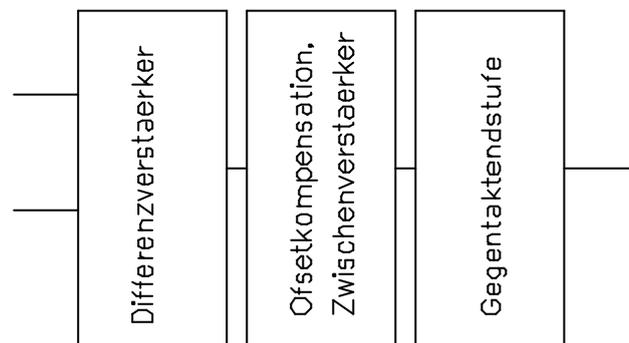
Durch Hintereinanderschalten zweier oder mehrerer Differenzverstärkerstufen läßt sich theoretisch eine unendliche Verstärkung erreichen. Praktisch sind der Gesamtverstärkung jedoch Grenzen durch die Ein- und Ausgangskapazitäten der Transistoren gesetzt.

Die dritte Grundschaltung stellt eine Gegentaktendstufe dar. Sie sorgt für sehr geringen Ausgangswiderstand, große Flankensteilheit und einen hohen Wirkungsgrad. Gegentaktendstufen finden auch in der Digitaltechnik Anwendung (Totem-Pole-Ausgänge in der TTL-Logik sowie aus MOS-Fets aufgebaute CMOS-IC's).



Die Gegentaktendstufe wird mit komplementären Transistoren aufgebaut, die synchron angesteuert werden. Wie man sieht, ist je nach Eingangspotential der obere oder der untere Transistor leitend, während der jeweils andere gesperrt ist. Die beiden Dioden sind erforderlich, damit an den Basis-Emitterstrecken der Transistoren eine Spannung wirksam werden kann. An ihrer Stelle kann auch ein niederohmiger Widerstand verwendet werden.

Mit diesen Voraussetzungen läßt sich nun das Blockschaltbild eines Operationsverstärkers angeben:

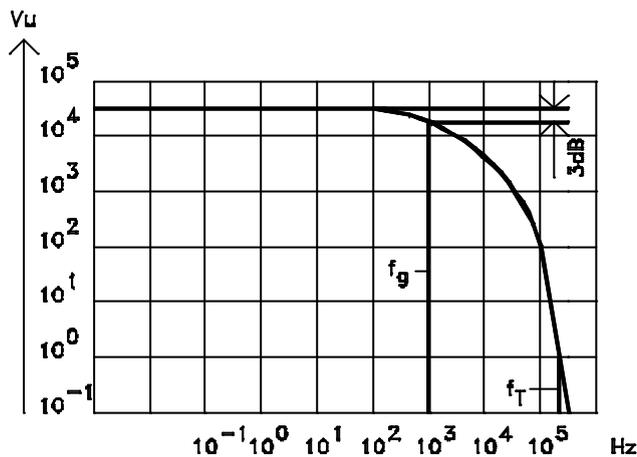


Die Zwischenverstärkerstufe besteht wiederum aus einer oder mehreren Differenzverstärkern. Die Offsetkompensation (s. nächstes Kapitel, Kennwerte) ist nicht in allen OP-Typen integriert und muß z.T. extern erfolgen.

III.4 Betriebsverhalten

Frequenzkompensation

Der Leerlaufverstärkungsfaktor V_0 bzw. das Leerlauf-Spannungsverstärkungsmaß v_0 nimmt mit zunehmender Frequenz der Eingangswechselspannung ab. Gleichzeitig erfährt die Ausgangsspannung mit zunehmender Frequenz eine zusätzliche Phasenverschiebung φ infolge der Sperrschichtkapazitäten. Da die Operationsverstärker meist mit Gegenkopplung (180° Phasenverschiebung) betrieben werden, wird mit dieser zusätzlichen Phasenverschiebung von -180° aus der Gegen- eine Mitkopplung. Bei einem Verstärkungsfaktor $V_0 > 1$ ist dann die Schwingungsbedingung gegeben.



Das nebenstehende Diagramm zeigt beispielhaft die Beziehung zwischen Verstärkungsfaktor und Frequenz. Wichtige Kennwerte des OP sind die Grenzfrequenz f_g , bei der die Verstärkung gegenüber der Frequenz 0 (Gleichspannung) um die Hälfte abgenommen hat (-3 dB), und die Transitfrequenz f_T , bei der die Spannungsverstärkung 0 dB (=1) beträgt.

In Datenblättern ist dieser Zusammenhang häufig als *Gain-Bandwith-Product* angegeben. Ein GBW von 1 Mhz z.B. bedeutet, daß die Leerlaufverstärkung bei 1 Hz 10^6 , bei 1 KHz 10^3 und bei 1 Mhz 1 beträgt.

Für die Schaltungsentwicklung bedeutet dies, daß bei sehr hoher Sollverstärkung u.U. mehrere Verstärkerstufen kaskadiert werden müssen.

Gleichtaktverstärkung

Legt man an beide Eingänge eines OP eine gleich große Spannung, so müßte der ideale Operationsverstärker dabei eine Ausgangsspannung von 0V liefern. Durch Temperaturdrift, Asymmetrie der Differenzverstärker und Bauteilalterung entstehen allerdings auch bei einer Eingangsdifferenzspannung von 0V Ausgangsspannungen $\neq 0$. Das Gleichtaktverstärkungsmaß (Common mode rejection ratio) gibt in dB das Verhältnis U_{aus} / U_{ein} an.

Beispiel:

Ein OP hat eine Gleichtaktverstärkung von -40 dB. Welche Ausgangsspannung entsteht bei einer Eingangsspannung von 1V an beiden Eingängen?

Lösung:

$$-40 \text{ dB} \rightarrow U_{aus} / U_{ein} = 10^{-2} \rightarrow U_{aus} = 0.01 \text{ V.}$$

Nullpunktabgleich

Beim realen OP liegt auch im nicht angesteuerten Betrieb zwischen den Eingängen eine geringe Gleichspannung, die durch den hohen Verstärkungsfaktor zu einer ungewollten Ausgangsspannung führt. Die Eingänge müssen daher mit einer entgegengesetzten Gleichspannung gleicher Größe abgeglichen werden. Dies geschieht entweder intern (und ist in den Kennwerten des OP angegeben), oder extern durch einen hierfür vorgesehenen Pin des OP.