Westfälische Wilhelms-Universität Münster
Institut für Angewandte Physik

Experimentelle Übungen für Fortgeschrittene

Operationsverstärker

März 2005

Ein *Operationsverstärker* ist ein gleichspannungsgekoppelter Differenzverstärker mit einem positiven (nichtinvertierenden) und einem negativen (invertierenden) Eingang sowie einem Ausgang. Ein Operationsverstärker verstärkt die Spannungsdifferenz zwischen den beiden Eingängen. Im Idealfall hängt die Wirkungsweise eines Operationsverstärkers nur von der äußeren Beschaltung ab. Da die Verstärkung eines Operationsverstärkers in linearen Schaltungen sehr hoch ist, wird diese über eine Gegenkopplung angepasst, indem ein Teil der Ausgangsspannung z. B. über einen Widerstand auf den invertierenden Eingang gegeben wird. Leitet man dagegen einen Teil der Ausgangsspannung auf den nichtinvertierenden Eingang zurück, erreicht man eine Mitkopplung und man kann Frequenzgeneratoren oder Kippschaltungen realisieren. Operationsverstärker gehören zu den wichtigsten Bausteinen der Analog-Elektronik und werden z. B. in der Mess- und Regeltechnik, Nachrichtentechnik und Unterhaltungs-Elektronik eingesetzt.

In diesem Versuch werden typische Eigenschaften von Operationsverstärkern untersucht und ausgewählte lineare und nichtlineare Schaltungen aufgebaut. Charakteristische Eigenschaften realer Operationsversärker sind z. B. der Frequenzgang der Leerlaufverstärkung und eine nicht verschwindende Gleichtaktverstärkung. Mathematische Operationen wie die Addition und Integration lassen sich einfach mit Operationsverstärkern durchführen. Zu den nichtlinearen Schaltungen zählen z. B. Komparatoren und Frequenz-Generatoren.

Kenntnisse

- Unterschiede zwischen einem realen und einem idealen Operationsverstärker
- Leerlaufverstärkung, Abhängigkeit von der Frequenz, Bode-Diagramm
- Gleichtaktverstärkung, Offsetspannung
- Invertierende und nichtinvertierende Verstärkerschaltung
- Gegenkopplung, Mitkopplung
- Lineare Schaltungen: Addierer, Integrator, Bandpassfilter
- Nichtlineare Schaltungen: Schmitt-Trigger, Multivibrator

Literatur

[1] Hering, Bressler, Gutekunst: *Elektronik für Ingenieure*, Springer, 2001
Kapitel 8 Analoge integrierte Schaltungen

[2] Weddigen, Jüngst: *Elektronik*, Springer, 1993

[3] Rohe: *Elektronik für Physiker*, Teubner Studienbücher, 1983

[4] Tietze, Schenk: *Halbleiter-Schaltungstechnik*, Springer, 2002

[5] `http://www.elektronik-kompendium.de/sites/bau/0209092.htm`
Das Elektronik-Kompendium: Operationsverstärker

[6] http://batronix.com/elektronik/know-how/op-amp.shtml
batronix.com: Grundlagen der Operationsverstärker

1 Grundlagen

1.1 Eigenschaften von Operationsverstärkern

1.1.1 Der ideale Operationsverstärker

Ein Operationsverstärker ist ein gleichspannungsgekoppelter Differenzverstärker mit dem invertierenden (–) und dem nichtinvertierenden (+) Eingang sowie dem Ausgang, vergleiche Abbildung 1 und Abbildung 2. Ein idealer Operationsverstärker zeichnet sich durch einen unendlich großen Eingangswiderstand $R_0 \to \infty$, einen Ausgangswiderstand $R_A \to 0$ und eine unendlich große Differenzverstärkung v_o aus. Ein idealer Operationsverstärker vergrößert die Spannungs-

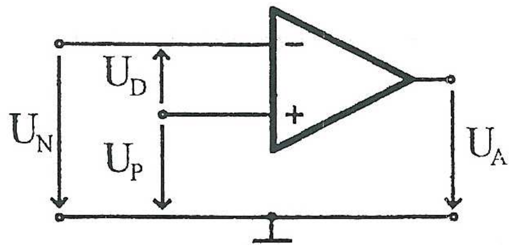

Abbildung 1: Schaltsymbol eines Operationsverstärkers

differenz $U_\mathrm{D} = U_\mathrm{P} - U_\mathrm{N}$, wobei U_P und U_N die Eingangsspannungen am nichtinvertierenden (positiven) bzw. am invertierenden (negativen) Eingang sind, mit der Leerlaufverstärkung v_0 (Spannungsverstärkung des unbeschalteten Verstärkers, im Englischen: open loop gain)

$$U_\mathrm{A} = v_0 U_\mathrm{D} = v_0(U_\mathrm{P} - U_\mathrm{N})\,. \tag{1}$$

Im Idealfall hängt die Wirkungsweise eines Operationsverstärkers in einer bestimmten Schaltung nur von der äußeren Beschaltung mit geeigneten Bauelementen ab. Der innere Aufbau des Operationsverstärkers spiegelt sich praktisch nur in seinen Kennwerten wieder. Man unterteilt Schaltungen mit Operationsverstärkern in zwei Hauptgruppen

$$\begin{array}{llcll} U_\mathrm{P} = 0: & U_\mathrm{A} & = & -v_0\,U_\mathrm{N} & \text{(invertierender Betrieb)} \\ U_\mathrm{N} = 0: & U_\mathrm{A} & = & v_0\,U_\mathrm{p} & \text{(nichtinvertierender Betrieb)} \end{array}$$

Die Gleichtaktverstärkung, d. h. die Verstärkung des Mittelwertes der beiden Eingangsspannungen, $v_\mathrm{Gl} = U_\mathrm{A}/U_\mathrm{Gl}$ mit $U_\mathrm{Gl} = (U_\mathrm{P} + U_\mathrm{N})/2$ ist beim idealen Operationsverstärker immer Null. Allgemein gilt jedoch

$$U_\mathrm{A} = v_0(U_\mathrm{P} - U_\mathrm{N}) + v_\mathrm{Gl}\frac{U_\mathrm{P} + U_\mathrm{N}}{2}\,. \tag{2}$$

In der Literatur und in Datenblättern wird häufig statt der Gleichtaktverstärkung die Gleichtaktunterdrückung G (engl.: CMRR common mode rejection ratio) in dB angegeben:

$$G = 20 \cdot \log \frac{v_0}{v_\mathrm{Gl}}\,.$$

1.1.2 Der reale Operationsverstärker

Im Ersatzschaltbild (Abb. 2) des realen Operationsverstärkers werden die technisch bedingten Unterschiede zum idealen Operationsverstärker deutlich.

Die folgende Tabelle weist einige Unterschiede auf:

Eigenschaft	ideal	real
v_0	∞	$10^5 \dots 10^8$
v_{Gl}	0	$0.1 \dots 3$
R_{D}	∞	$10^7\,\Omega \dots 10^{12}\,\Omega$
$R_{\mathrm{P}}, R_{\mathrm{N}}$	∞	$R_{\mathrm{P}}, R_{\mathrm{N}} \gg R_{\mathrm{D}}$
R_{A}	0	$10\,\Omega \dots 10^3\,\Omega$
$I_{\mathrm{P}}, I_{\mathrm{N}}$	0	$0.1\,\mathrm{nA} \dots 25\,\mathrm{nA}$
Slew rate	∞	$0.5\,\mathrm{V}/\mu\mathrm{s} \dots 1\,\mathrm{V/ns}$
U_0	0	$0.1\,\mathrm{mV} \dots 5\,\mathrm{mV}$

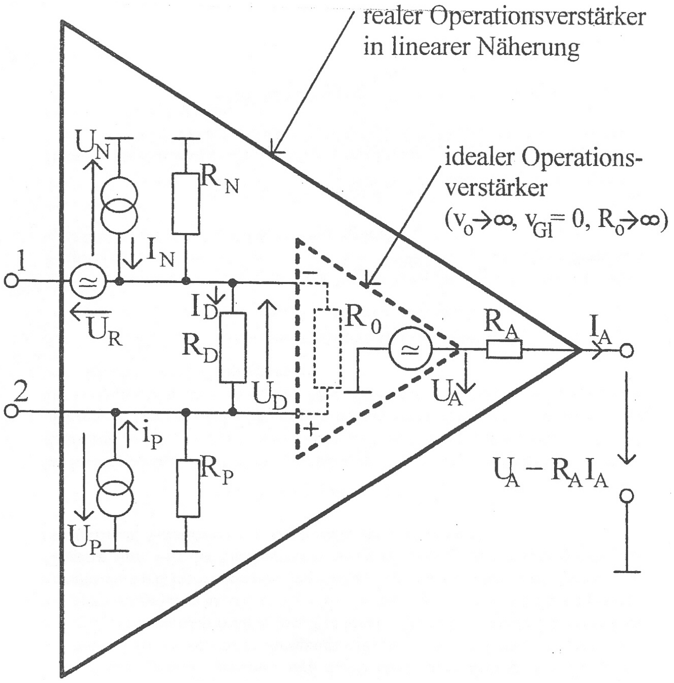

Abbildung 2: Niederfrequenzersatzschaldbild eines Operationsverstärkers in linearer Näherung

Darüber hinaus treten beim realen Operationsverstärker herstellungsbedingt Unsymmetrien zwischen beiden Eingängen auf, die zu einer Offsetspannung U_0 (Gleichanteil von U_{R} in Abb. 2) und Offsetgleichströmen I_{P}, I_{N} führen. Das Eigenrauschen ist ebenfalls zu berücksichtigen (Wechselkomponente der Generatoren U_{R}, I_{P} und I_{N} in Abb. 2). Im Gegensatz zum idealen Operationsverstärker ist die Leerlaufverstärkung v_0 nicht nur endlich, sondern zusätzlich noch frequenzabhängig. Der Frequenzgang ist in der Regel intern beim eigentlichen Operationsverstärker so eingestellt:

$$V_0(f) = |V_0|\, e^{i\phi} = \frac{v_0}{1 + i\omega\tau} = \frac{v_0}{1 + i\frac{f}{f_{\mathrm{g}}}} \tag{3}$$

$$\tau = \frac{1}{2\pi f_{\mathrm{g}}} \qquad ; \qquad \omega = 2\pi f$$

Auf diese Weise wird die Schwingungsneigung beschalteter Operationsverstärker optimal unterdrückt. Dabei ist f_g die Grenzfrequenz des Operationsverstärkers, d. h. die Frequenz, bei der v_0 um 3 dB unter dem Maximalwert liegt. Es gilt genähert

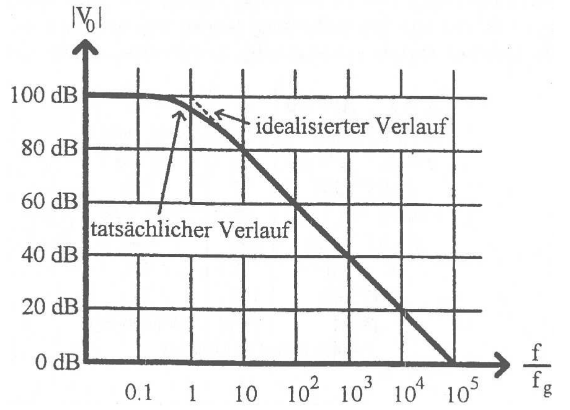

Abbildung 3: Frequenzgang der Leerlaufverstärkung (Bode-Diagramm)

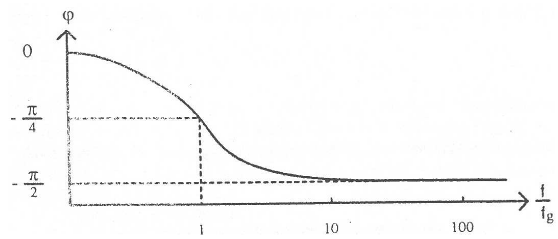

Abbildung 4: Phasenverschiebung in Abhängigkeit der Frequenz (nichtinvertierender Verstärker)

$$|V_0(f)| = \begin{cases} v_0 & \text{für} \quad f \ll f_g \\ v_0 f_g / f & \text{für} \quad f \gg f_g \,. \end{cases}$$

Die obige Gleichung gibt das Verstärkungs-Bandbreite-Produkt an

$$|V_0(f)| \cdot f = v_0 \cdot f_g \qquad \text{für } f \gg f_g \,.$$

Die Frequenz, bei der die Leerlaufverstärkung auf $|V_0(f_T)| = 1$ (entsprechend 0 dB) abgesunken ist, heißt Transitfrequenz $f_T = v_0 f_g$. Mit der Frequenz ändert sich auch die Phasenbeziehung zwischen Eingangs- und Ausgangssignal. Die Phasenverschiebung berechnet sich aus

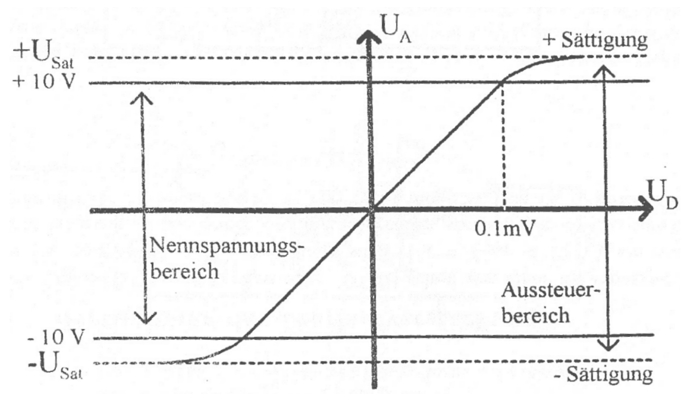

Abbildung 5: Schematische Leerlaufkennlinie eines Operationsverstärkers (Beispiel mit $v_0 = 10^5$)

$$\tan \phi = \frac{\Im v_0}{\Re v_0} = -\omega \tau$$

für den nichtinvertierenden Betrieb (siehe Abb. 4). Im invertierenden Betrieb ist eine konstante Phase von $-\pi$ zu addieren.

Die Leerlaufverstärkung v_0 ist von der Temperatur, der Versorgungsspannung und Alterungsprozessen, wie der Degradation, abhängig. Die Leerlaufverstärkung v_0 ist die Kleinsignalverstärkung. Sie gilt nur im linearen Aussteuerungsbereich des Operationsverstärkers.

Man unterscheidet bei einem Operationsverstärker zwischen dem Nennspannungsbereich für die Ausgangsspannung, in dem ein linearer Zusammenhang zwischen U_D und U_A besteht

$$U_\mathrm{A} = v_0 U_\mathrm{D} \tag{4}$$

und dem Aussteuerbereich, der durch die maximale Ausgangsspannung begrenzt wird. Liefert ein Operationsverstärker die maximale Ausgangsspannung, die von der Versorgungsspannung abhängt, so befindet sich der Operationsverstärker im Sättigungszustand (siehe Abb. 5).

1.1.3 „Goldene Regeln"

Zur Berechnung von Schaltungen mit Operationsverstärkern dürfen häufig folgende Regeln angewendet werden, die auf der Annahme eines idealen Operationsverstärkers beruhen.

- Die Spannungsdifferenz U_D zwischen den beiden Eingängen des Operationsverstärkers ist Null. Also gilt
$$U_\mathrm{P} = U_\mathrm{N}\,. \tag{5}$$
- Durch die Eingänge des Operationsverstärkers fließt kein Strom:
$$R_\mathrm{D} = R_\mathrm{P} = R_\mathrm{N} = \infty\,. \tag{6}$$
- Bis zum maximal zulässigen Ausgangsstrom ist der Operationsverstärker beliebig belastbar:
$$R_\mathrm{A} = 0\,. \tag{7}$$

1.1.4 Kompensation der Offsetspannung

Aufgrund der bereits erwähnten Fertigungstoleranzen, die bei der Produktion integrierter Schaltungen auftreten, ist eine ideale Symmetrie zwischen den zwei Eingängen eines Operationsverstärkers nicht möglich. Dies hat zur Folge, dass die Ausgangsspannung erst bei einer von Null verschiedenen Differenzspannung $U_\mathrm{D} = -U_0$ verschwindet. Mit dieser Differenzspannung kompensiert man gerade die sogenannte Offsetspannung. Zur Kompensation der Offsetspannung sind bei einigen Operationsverstärkern (z. B. LM 741) Anschlüsse herausgeführt, an die ein Potentiometer angeschlossen wird. Legt man die beiden Eingänge des Operationsverstärkers auf Massepotential, so lässt sich der Betrag der Ausgangsspannung mit Hilfe des Potentiometers minimieren.

1.1.5 Bestimmung der Leerlaufverstärkung

Da ein Operationsverstärker mit $v_0 = 100\,\mathrm{dB}$ schon von einer Eingangsspannung $U_\mathrm{N} = 0.1\,\mathrm{mV}$ voll ausgesteuert wird ($U_\mathrm{A} = U_\mathrm{Sat} \approx 10V$), aber an seinem Eingang auch Gleichspannungsstörgrößen von einigen μV existieren, ist eine direkte Messung von $v_0 = U_\mathrm{A}/U_\mathrm{N}$ nicht möglich. Hier ist v_0 größer als der Dynamikbereich $U_\mathrm{Sat}/U_\mathrm{St}$.

Nach Abb. 6 ist die Verstärkung der Störspannung $U_\mathrm{St} = U_\mathrm{R} + U_\mathrm{Ant}$ begrenzt. Es gilt nämlich:

$$U_\mathrm{A} \approx -U_\mathrm{St} \cdot \frac{2(R_1 + R_2) + R_3}{R_1} \qquad (\mathrm{bei} U_1 = 0)\,.$$

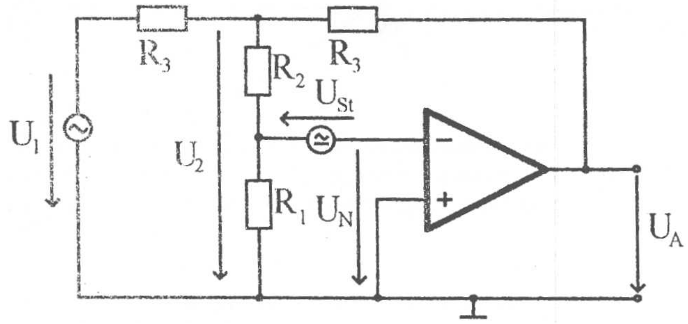

Abbildung 6: Schaltung zur Messung der Leerlaufverstärkung (Dimensionierungsbeispiel: $R_1 = 100\,\Omega$, $R_2 = 100\,\mathrm{k}\Omega$, $R_3 = 10\,\mathrm{k}\Omega$)

Dabei fasst U_{Ant} die durch einstrahlende elektromagnetische Wellen verursachten Spannungen zusammen. Man misst U_2 und erhält U_{N} für $U_{\mathrm{St}} = 0$ aus

$$U_{\mathrm{N}} = U_2 \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \,.$$

Mit $U_{\mathrm{A}} = -v_0 U_{\mathrm{N}}$ folgt dann

$$v_0 = -\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{U_{\mathrm{A}}}{U_2} \,. \tag{8}$$

Man wählt die Widerstände R_1, R_2 und R_3 so, dass die Störspannung nicht zu sehr verstärkt wird und U_2 bequem messbare Werte annimmt.

1.1.6 Bestimmung der Gleichtaktverstärkung

Beim idealen Differenzverstärker ist die Ausgangsspannung unabhängig vom absoluten Potential, auf dem beide Eingänge liegen. Ein realer Operationsverstärker kann dieses nicht leisten. Mit dem Aufbau gemäß Abb. 7 lässt sich die Gleichtaktverstärkung messen.

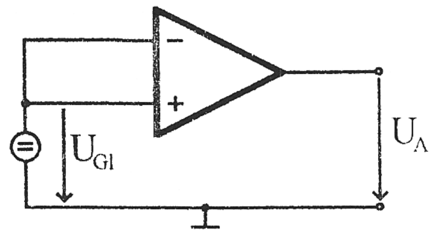

Abbildung 7: Bestimmung der Gleichtaktverstärkung

Es gilt mit $U_{\mathrm{P}} = U_{\mathrm{N}} = U_{\mathrm{Gl}}$ und Gleichung (4)

$$\begin{aligned} U_A &= (v_0 + \frac{1}{2} v_{\mathrm{Gl}}) U_{\mathrm{Gl}} - (v_0 - \frac{1}{2} v_{\mathrm{Gl}})(U_{\mathrm{Gl}} + U_0) \\ &= -v_0 U_0 + v_{\mathrm{Gl}}(U_{\mathrm{Gl}} + \frac{1}{2} U_0) \,. \end{aligned}$$

Um den Einfluss der Offsetspannung zu kompensieren, wird die Messung für zwei Gleichtaktspannungen U_{Gl} und U'_{Gl} durchgeführt, und es ergibt sich

$$v_{\mathrm{Gl}} = \frac{U_{\mathrm{A}} - U'_{\mathrm{A}}}{U_{\mathrm{Gl}} - U'_{\mathrm{Gl}}} \,. \tag{9}$$

Die Gleichtaktverstärkung ist bei einem nicht defekten Operationsverstärker um Größenordnungen kleiner, als die Differenzverstärkung ($v_{\mathrm{Gl}} \ll v_0$).

Bei bekannter Gleichtaktverstärkung lässt sich die Offsetspannung bestimmen. Dazu wird U_{Gl} so eingestellt, dass $U_{\mathrm{A}} \approx 0$ ist. Unter der Annahme, dass $\left|\frac{1}{2}\,U_0\right| \ll |U_{\mathrm{Gl}}|$ ist, folgt dann

$$\begin{aligned} 0 &= v_{\mathrm{Gl}} U_{\mathrm{Gl}} - v_0 U_0 \\ \Rightarrow U_0 &= \frac{v_{\mathrm{Gl}}}{v_0}\, U_{\mathrm{Gl}}\,. \end{aligned}$$

Frage: Ist die obige Annahme in der Schaltung erfüllt?

1.2 Lineare Schaltungen mit Operationsverstärkern

Operationsverstärker verdanken ihren Namen der Eigenschaft, dass durch wenige externe Bauteile Schaltungen entstehen, die mathematische Operationen elektrisch realisieren. So lassen sich z. B. Addierer, Subtrahierer, Multiplizierer, Integrierer und Dividierer mit Operationsverstärkern aufbauen. Darüberhinaus stellt der Operationsverstärker durch den geringen externen Bauteilaufwand den Grundbaustein vieler anderer Schaltungen dar. Mit Operationsverstärkern lassen sich leicht aktive Filter, Verstärker, Messgeräte oder auch Stromquellen aufbauen.

1.2.1 Der invertierende Verstärker

Diese Schaltung wird auch operationeller Umkehrverstärker genannt, da sie die Basis für alle Schaltungen bildet, die mathematische Operationen realisieren.

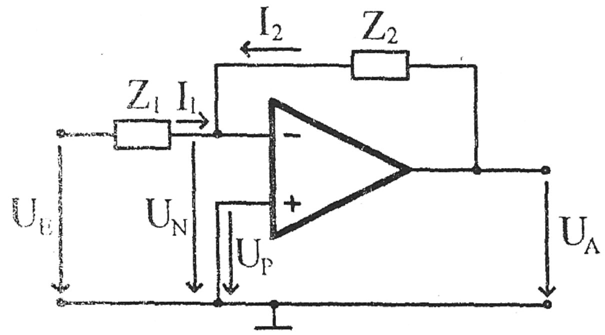

Abbildung 8: Die Grundschaltung des invertierenden Verstärkers

Durch Anwendung der Kirchhoffschen Regeln und des Ohmschen Gesetzes erhält man unter Berücksichtigung der „Goldenen Regeln“ (Eingangsstrom $\approx 0\,\mathrm{A}$, $U_{\mathrm{D}} \approx 0\,\mathrm{V}$, vergleiche Abschnitt 1.1.3)

$$I_1 + I_2 = 0, \qquad I_1 = \frac{U_{\mathrm{E}}}{Z_1}, \qquad I_2 = \frac{U_{\mathrm{A}}}{Z_2}\,.$$

Dieses liefert unmittelbar die Verstärkung des beschalteten Verstärkers

$$v = \frac{U_{\mathrm{A}}}{U_{\mathrm{E}}} = -\frac{Z_2}{Z_1}\,. \qquad (10)$$

Da das Ausgangssignal wieder invertiert auf den Eingang des Operationsverstärkers gegenphasig zurückgeführt wird, spricht man auch von einer *Gegenkopplung.* Die so festgelegte Verstärkung der Schaltung heißt „Schleifenverstärkung“. Für $Z_1 = Z_2 = R$ folgt insbesondere $v = -1$ (Inverter).

Da $V_0(f)$ bei höheren Frequenzen (rasch) abfällt (siehe Abb. 3), ist die obige Herleitung von v hier nicht mehr genau genug. Bei endlichem v_0 ($U_\mathrm{N} \neq 0$), aber noch genügend hohem Eingangswiderstand ($I_\mathrm{N} = 0$) ergibt sich dann nach Abb. 8

$$\begin{aligned} U_\mathrm{A} &= -V_0(f) \cdot U_\mathrm{N} \\ I_\mathrm{N} = 0 \quad &; \quad I_1 + I_2 = 0 \\ I_1 = \frac{U_\mathrm{E} - U_\mathrm{N}}{Z_1} \quad &; \quad I_2 = \frac{U_\mathrm{A} - U_\mathrm{N}}{Z_2} \end{aligned}$$

und das Ergebnis

$$v = \frac{U_\mathrm{A}}{U_\mathrm{E}} = -\frac{V_0(f)}{1 + \frac{Z_1}{Z_2} \cdot (1 + V_0(f))} \,. \tag{11}$$

Für $V_0(f) \to \infty$ geht (11) wieder in (10) über. Aus Gleichung (11) gewinnt man durch Differentiation nach $V_0(f)$ und mit der Bezeichnung $K = Z_1/Z_2$

$$\frac{dv}{v} = \frac{1 + K}{1 + K \cdot (1 + V_0(f))} \cdot \frac{dV_0(f)}{V_0(f)} \,. \tag{12}$$

Diese Gleichung besagt, dass Änderungen in $V_0(f)$ auf die Verstärkung v nur um den Faktor $1 + K$ dividiert durch die Verstärkungsreserve $1 + K \cdot (1 + V_0(f))$ durchschlagen.

1.2.2 Der nicht-invertierende Verstärker

Diese Schaltung wird häufig auch als Elektrometerverstärker bezeichnet. Sie besitzt gegenüber dem invertierenden Verstärker einen sehr viel höheren Eingangswiderstand und niederohmigeren Ausgang. Die Einstellung der Schleifenverstärkung erfolgt hier ebenfalls im invertierenden Ast der Schaltung (siehe Abb. 9). Der Vergleich der beiden Verstärkerversionen zeigt, dass auf der

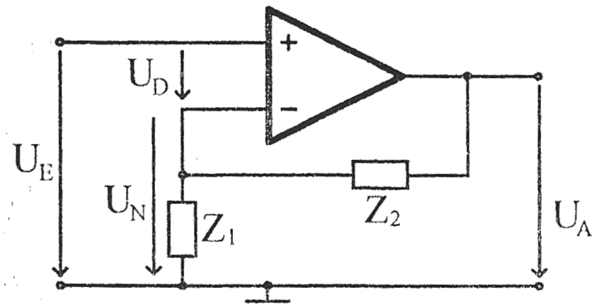

Abbildung 9: Der Elektrometerverstärker

Eingangsseite der Schaltung nur die Signal- und Massezuführung vertauscht sind.

Bei Anwendung der „Goldenen Regeln“ erhält man:

$$U_\mathrm{E} = U_\mathrm{N} \qquad \text{und} \qquad \frac{U_\mathrm{A}}{U_\mathrm{N}} = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1}$$

und somit die Verstärkung

$$v = \frac{U_\mathrm{A}}{U_\mathrm{E}} = 1 + \frac{Z_2}{Z_1} \,. \tag{13}$$

Für $Z_2 \to 0$ oder $Z_1 \to \infty$ folgt dann $v = 1$. Diese Variante wird auch als Spannungsfolger, Pufferverstärker oder Impedanzwandler bezeichnet.

1.2.3 Der Addierer

Für die Realisierung einer einfachen Rechenoperation muss die Schaltung aus Abb. 8 nur um wenige Bauteile erweitert werden.

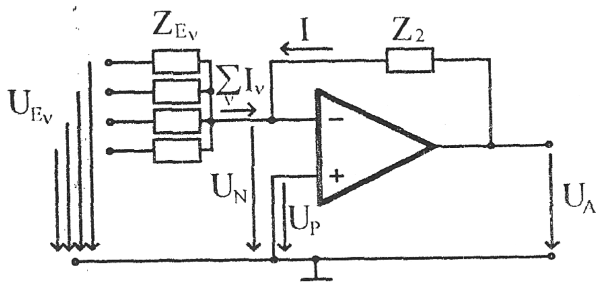

Abbildung 10: Der invertierende Addierer

Hier gilt dann die Abänderung der oben genannten Gleichungen für den invertierenden Verstärker:

$$\sum_{\nu=1}^{n} I_\nu + I = 0; \qquad I_\nu = \frac{U_{E_\nu}}{R_\nu}; \qquad I = \frac{U_\mathrm{A}}{R}\,.$$

Daraus folgt, dass sich die Ausgangsspannungen als gewichtete Summe der Eingangsspannungen bildet. Die jeweiligen Gewichte werden dabei durch das Widerstandsverhältnis R/R_ν festgelegt

$$U_\mathrm{A} = -R\sum_{\nu=1}^{n} \frac{U_{E_\nu}}{R_\nu}\,. \tag{14}$$

1.2.4 Der Integrator

Eine weitere mathematische Operation, die sich mit Operationsverstärkern elektronisch umsetzen lässt, ist die Integration mit der Schaltung nach Abb. 11.

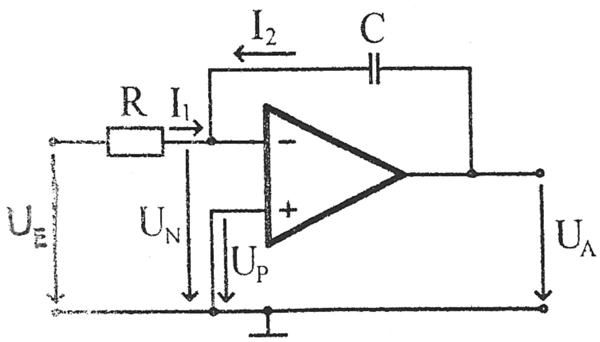

Abbildung 11: Der Integrator

Berechnung im Reellen

$$I_1 = \frac{U_\mathrm{E}}{R} = -I_2 = -\frac{dQ}{dt} = -C\frac{dU_A}{dt}\,.$$

Für $U_\mathrm{A}(t=0) = 0$ (Anfangswert) folgt dann das bestimmte Integral

$$U_\mathrm{A}(t) = -\frac{1}{RC}\int_0^{t_1} U_\mathrm{E}(t)\,dt\,. \tag{15}$$

Berechnung im Komplexen Mit den komplexwertigen Spannungen U_E und U_A gilt (siehe Gleichung (10)):

$$v = \frac{U_\mathrm{A}}{U_\mathrm{E}} = -\frac{1/i\omega C}{R} = -\frac{1}{i\omega RC}\,.$$

Somit folgt als Verstärkung für den Integrator die wichtige Proportionalität

$$v \propto \frac{1}{i\omega}\,. \tag{16}$$

Betrachtet man die Herleitung im Komplexen genauer und berücksichtigt dabei Gleichung (11), so ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\begin{aligned} v &= -\frac{V_0(f)}{1 + i\omega RC(1+V_0(f))} \\ \Rightarrow \omega &> \frac{1}{RC(1+V_0(f))} \approx \frac{1}{V_0(f)RC}\,. \end{aligned} \tag{17}$$

Gleichung (16) ist also nur für $\omega > \frac{1}{V_0(f)RC}$ erfüllt. Für kleinere Frequenzen ist $v = |V_0(f)|$, und es wird nicht mehr integriert.

Frage: Welchen Vorteil bietet ein aktiver Integrator (mit Operationsverstärker) gegenüber einer passiven Schaltung?

1.2.5 Der Bandpass-Filter

Mit der invertierenden Grundschaltung lässt sich auf einfache Weise ein frequenzselektiver Verstärker aufbauen. Ein solcher aktiver Filter weist gegenüber passiven Aufbauten eine deutlich höhere Flankensteilheit auf. Die Trennung zwischen dem Nutzsignal und dem zu unterdrückenden Signal erfolgt hierdurch sehr viel schärfer. Abb. 12 zeigt ein Bandpassfilter, das

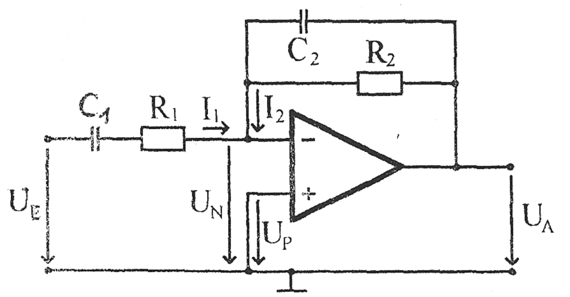

Abbildung 12: Bandpassfilter

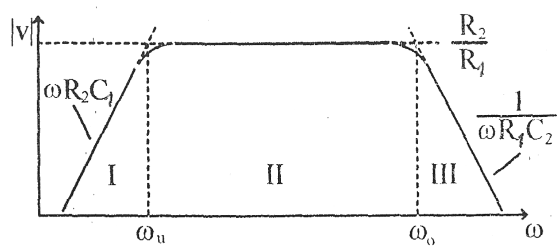

Abbildung 13: Frequenzabhängiges Verstärkungsverhalten des Bandpassfilters

einen Frequenzbereich zwischen f_u und f_o verstärkt und Frequenzen unterhalb f_u bzw. oberhalb f_o abschwächt. Die Kennlinie dieses Aufbaus ist in Abb. 13 aufgezeigt.

Für die Schaltung in Abb. 12 ist

$$Z_1 = R_1 + \frac{1}{i\omega C_1} \quad \text{und} \quad Z_2 = \frac{R_2}{1 + i\omega C_2 R_2}\,.$$

Daraus folgt mit (10)

$$\begin{aligned} v &= -\frac{i\omega C_1 R_2}{(1+i\omega C_1 R_1)\,(1+i\omega C_2 R_2)} \\ \Rightarrow |v| &= \frac{\omega C_1 R_2}{\sqrt{(1+(\omega C_1 R_1)^2)\cdot(1+(\omega C_2 R_2)^2)}}\,. \end{aligned} \tag{18}$$

Für $C_1R_1 \gg C_2R_2$ ergibt sich dann der in Abb. 13 aufgetragene Verlauf in doppelt-logarithmischer Darstellung (Bode-Diagramm).

Die untere und obere Grenzfrequenz f_u und f_o des Bandpassfilters sind folgendermaßen definiert:

$$2\pi f_\mathrm{u} R_2 C_1 = \frac{R_2}{R_1} \quad \rightarrow \quad f_\mathrm{u} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \tag{19}$$

$$\frac{1}{2\pi f_\mathrm{o} R_1 C_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad \rightarrow \quad f_\mathrm{o} = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} > f_\mathrm{u}\,. \tag{20}$$

Die Verstärkung der Filterschaltung lässt sich in drei Frequenzbereiche unterteilen. Es gilt im Einzelnen:

Bereich I:$(f \ll f_\mathrm{u})$

$$2\pi f R_1 C_1 \ll 1; \qquad |v| \approx 2\pi f R_2 C_1\,. \tag{21}$$

Bereich II: $(f_\mathrm{u} \ll f \ll f_\mathrm{o})$

$$2\pi f R_1 C_1 \gg 1; \qquad 2\pi R_2 C_2 \ll 1; \qquad |v| = \frac{R_2}{R_1}\,. \tag{22}$$

Bereich III:$(f \gg f_o)$

$$2\pi f R_2 C_2 \gg 1; \qquad |v| \approx \frac{1}{2\pi f R_1 C_2}\,. \tag{23}$$

1.3 Nichtlineare Schaltungen mit Operationsverstärkern

Neben den linearen Schaltungen gibt es eine Vielzahl von nichtlinearen Schaltungen, in denen Operationsverstärker eingesetzt werden. Hierzu zählen Analogschalter, nichtlineare Komparatoren (Schmitt-Trigger), aber auch Gleichrichterschaltungen (Halbwellen- und Vollwellengleichrichter), Spitzenwertdetektoren und Analog-Digital-Wandler.

1.3.1 Der Schmitt-Trigger

Hierbei handelt es sich um eine spezielle Form des Komparators. Die Ausgangsspannung U_A ist gleich der positiven (negativen) Sättigungsspannung des Operationsverstärkers, wenn eine Schaltschwelle $U^{\pm}_\mathrm{Schwell}$ über-/unterschritten wird. Beim Schmitt-Trigger existieren zwei getrennte Schaltschwellen für den Wechsel der Ausgangsspannung, es existiert eine Schalthysterese.

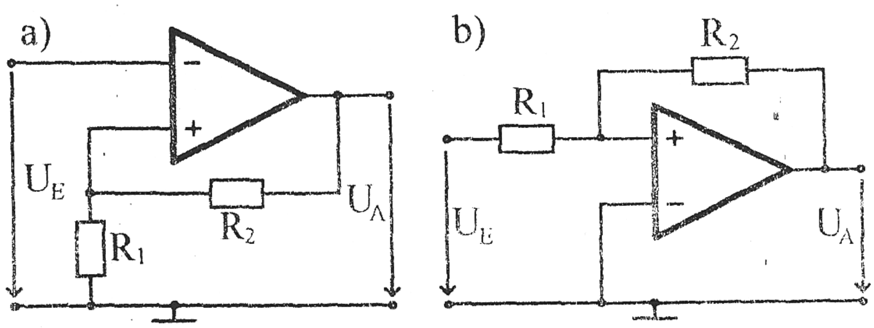

Abbildung 14: Invertierender (a) und nichtinvertierender (b) Schmitt-Trigger

Der Schmitt-Trigger in Abb. 14a enthält eine Mitkopplung vom Ausgang zum nichtinvertierenden Eingang über den Spannungsteiler R_1, R_2. Durch die Mitkopplung ist sichergestellt, dass die Ausgangsspannung sofort ihren Sättigungswert annimmt. Weiterhin ist dadurch die Schalthysterese bedingt, da die Schaltschwelle von der jeweiligen Ausgangsspannung U_A abhängt. Die Schwellspannung $U^{\pm}_\mathrm{Schwell}$ bestimmt sich dann zu

$$U^{\pm}_\mathrm{Schwell} = \pm \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_\mathrm{Sat} \,. \tag{24}$$

Vertauscht man das Eingangssignal U_E und Masse, so folgt daraus die Schaltung in Abb. 14b. Für die Schaltschwellen gilt dann mit $U_\mathrm{E} = U_\mathrm{Schwell}$ und $U_\mathrm{A} = U_\mathrm{Sat}$:

$$\begin{aligned} \frac{U_\mathrm{Schwell}}{R_1} &= \frac{U_\mathrm{Sat}}{R_2} \\ U^{\pm}_\mathrm{Schwell} &= \pm \frac{R_1}{R_2} U_\mathrm{Sat} \,. \end{aligned} \tag{25}$$

Bei dieser Variante kann die Hysterese zusätzlich verschoben werden. Dazu dient eine Spannung U_N, die an den invertierenden Eingang des Operationsverstärkers gelegt wird.

Frage: Leiten Sie $U^{\pm}_\mathrm{Schwell}$ für den Fall her, dass zusätzlich eine Spannung U_N in der Schaltung nach Abb. 14b anliegt.

1.3.2 Der Multivibrator

Eine Abänderung des Schmitt-Triggers aus Abb. 14a stellt der Multivibrator in Abb. 15 dar. An den Eingang des Schmitt-Triggers wird eine zeitabhängige Kondensatorspannung geschaltet.

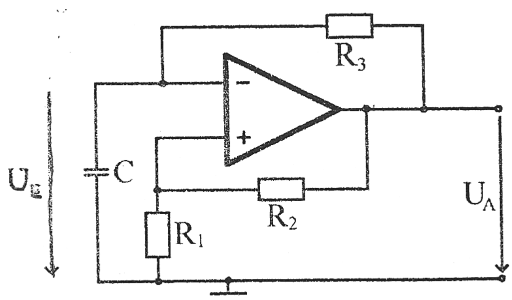

Abbildung 15: Schaltung des astabilen Multivibrators (Rechteckgenerator)

Der Kondensator C wird von der Ausgangsspannung $U_\mathrm{A} = +U_\mathrm{Sat}$ über den Widerstand R_3 aufgeladen (vergleiche Abb. 5). Sobald die Spannung über dem Kondensator

$$U_\mathrm{E} = U_\mathrm{Sat} \left(1 - e^{-t/RC}\right)$$

die Schaltschwelle U_Sat des Schmitt-Triggers, siehe Gleichung (24), erreicht, wechselt die Ausgangsspannung auf $U_\mathrm{A} = -U_\mathrm{Sat}$. Der Kondensator wird nun über R_3 entladen, bis $U_\mathrm{E} = U^{-}_\mathrm{Schwell}$ erreicht wird und U_A erneut die Polarität wechselt. Die Schwingungsdauer ist gleich der Zeit, die benötigt wird, um den Kondensator von U^{-}_Schwell auf U^{+}_Schwell und zurück auf U^{-}_Schwell zu bringen:

$$T = 2RC \ln\left(1 + \frac{2R_1}{R_2}\right) \,. \tag{26}$$

Frage: Wie lässt sich die Schaltung abändern, so dass die Ausgangsspannung U_A von verschieden langer Dauer positiv und negativ ist? (Tastverhältnis $\neq$ 1:1)

2 Geräte und Zubehör

- Oszilloskop (Hameg HM203-7, 20 MHz)
- Frequenzgenerator (Instek GFG-8255A)
- Operationsverstärker mit Steckbrett
- Spannungsversorgung (15 V, max. 250 mA)
- Millivoltmeter (BN12003, 10 Hz-1 MHz)
- Handmultimeter (Fluke 79)
- Kondensatoren, Widerstände

3 Aufgaben & Hinweise

- **Kompensation der Offsetspannung**
  Legen Sie die Eingänge des OPV auf Masse und regeln Sie mit dem Potentiometer die Aussgangsspannung auf Null. Wie genau lässt sich $U_\mathrm{A} = 0\,\mathrm{V}$ einstellen?
- **Bestimmung der Leerlaufverstärkung** (Abb. 6)
  a) Gleichspannung: Messen Sie U_A und U_2 und bestimmen Sie die Leerlaufverstärkung v_0 (Grafik)
  b) Wechselspannung: Messen Sie U_A bei fester Eingangsspannung U_2 für verschiedene Frequenzen f und berechnen Sie die Verstärkung $V_0(f)$. Erstellen Sie ein Bode-Diagramm. Bestimmen Sie die Grenzfrequenz f_g und die Transitfrequenz f_T.
- **Bestimmung der Gleichtaktverstärkung** (Abb. 7)
  Bestimmen Sie U_A in Abhängigkeit von der Gleichspannung U_Gl und tragen Sie $U_\mathrm{A}(U_\mathrm{Gl})$ grafisch auf. Bestimmen Sie aus der Steigung die Gleichtaktverstärkung v_Gl.
- **Invertierender Verstärker** (Abb. 8)
  a) Gleichspannung: Messen Sie die Verstärkung für verschiedene Widerstände Z_1 und Z_2.
  b) Wechselspannung: Messen Sie die Verstärkung bei konstanter Eingangsspannung in Abhängigkeit von der Frequenz und erstellen Sie ein Bode-Diagramm. Vergleichen Sie den Frequenzgang des invertierenden Verstärkers und der Leerlaufverstärkung.
- **Nichtinvertierender Verstärker** (Abb. 9)
  Bauen Sie einen Spannungsfolger auf und überprüfen Sie seine Funktionsweise. Messen Sie die Phasenverschiebung in Abhängigkeit der Frequenz (Grafik).
- **Addierer** (Abb. 10)
  Messen Sie die Verstärkung für unterschiedliche Widerstandskombinationen.
- **Integrator** (Abb. 11)
  Untersuchen Sie die Funktionsweise eines Integrators qualitativ durch Anlegen verschiedener Wechselspannungen (Sinus, Rechteck, Dreieck). Geben Sie Werte für R, C und ω an.
- **Bandpassfilter** (Abb. 12)
  Wählen Sie R_1, R_2, C_1 und C_2 so, dass die untere Abschneidefrequenz f_u einige kHz und die obere Abschneidefrequenz f_o ca. 20 kHz beträgt. Vergleichen Sie die gemessene Verstärkung aus den drei typischen Frequenzbereichen mit der Theorie (grafische Auftragung als Bode-Diagramm).
- **Schmitt-Trigger** (Abb. 14)
  Bauen Sie einen invertierenden oder einen nichtinvertierenden Schmitt-Trigger auf. Messen Sie die Schalthysterese und stellen Sie diese grafisch dar. Wie groß ist die Schwellwert-Spannung $\mathrm{U}_\mathrm{Schwell}$ in Abhängigkeit der Impedanzen?

- **Multivibrator** (Abb. 15)
  Bestimmen Sie die Schwingungsdauer.

4 Fragen zur Vorbereitung

- Welches sind die Eigenschaften eines idealen Operationsverstärkers?
- Wie sieht schematisch der interne Aufbau eines Operationsverstärkers aus?
- Wie sieht der Frequenzgang der Leerlaufverstärkung in doppelt-logarithmischer Auftragung und in „nicht“-logarithmischer Auftragung aus?
- Warum kann man die Leerlaufverstärkung eines Operationsverstärkers nicht direkt durch Anlegen einer Spannungsdifferenz U_D bestimmen?
- Was versteht man unter Gegenkopplung und Mitkopplung? Was kann bei einer Schaltung mit Gegenkopplung passieren, wenn die Frequenz der Eingangsspannung zu groß wird?
- Wie berechnet man die Verstärkung eines invertierenden Verstärkers, wenn man nicht von den idealen Eigenschaften eines Operationsverstärkers ausgeht?
- Wie ist ein Differenziator aufgebaut?
- Was ist ein Impedanzwandler und für welchen Zweck kann man ihn einsetzen?
- Wie kann man mit einem Operationsverstärker einen Hoch- und einen Tiefpassfilter realisieren?
- Wie ist ein Komparator aufgebaut?