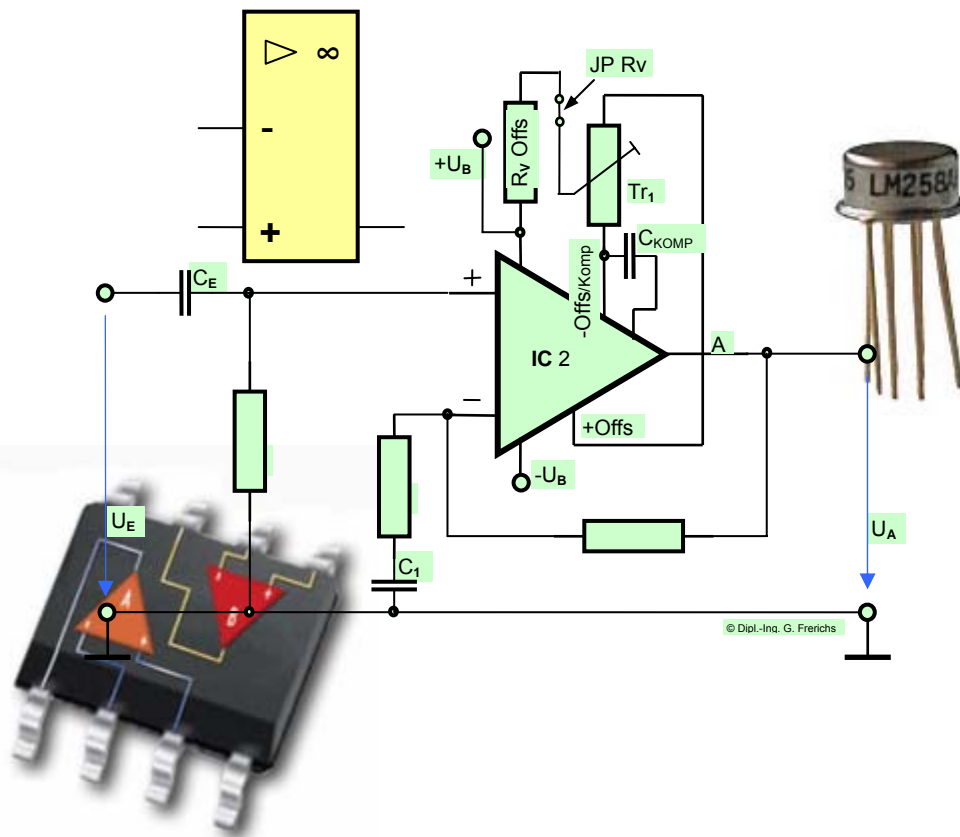


Dipl.-Ing. Gerd Frerichs

Elektronik u. Breitbandkommunikationstechnik
Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Operationsverstärker



26340 Zetel, Tel.: 04453 / 486572

eMail: pp-base@g-frerichs.de

HP: www.g-frerichs.de

Operationsverstärker

Inhaltsverzeichnis

Operationsverstärker	3
1. Einführung.....	3
2. Grundlagen, Betriebsspannung	4
a) Grundsaltungen.....	5
b) Betriebsspannung	6
3. Gleichspannungsverstärker	7
a) Offsetspannung.....	7
b) Invertierender Verstärker	7
c) Nicht invertierender Verstärker	8
d) Komparator	9
4. Wechselspannungsverstärker.....	9
a) RC-Filter.....	10
b) NF-Verstärker	10
5. Simulation elektronischer Schaltungen	11
a) Einführung.....	11
b) Simulationsarten	13
c) Allgemeine Hinweise.....	13
d) Simulation einer Einweg-Gleichrichterschaltung.....	14
6. Literatur	14

Operationsverstärker

1. Einführung

Operationsverstärker, ein aktuelles elektronisches Bauteil, 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.

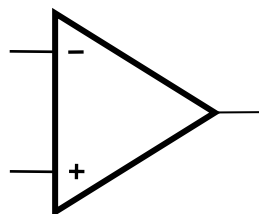


Bild 1: Schaltsymbol für einen OpAmp nach US-Norm

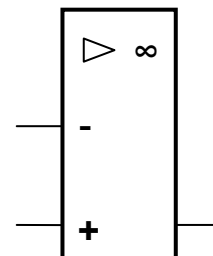


Bild 2: Schaltsymbol für einen OpAmp nach Euro-Norm

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 neg. Eingang steht mit einer Phasendrehung von 180° verstärkt am Ausgang zur Verfügung. Eine Spannung am pos. 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). Für den

Operationsverstärker, Grundlagen-Einführung

2. Grundlagen, Betriebsspannung

a) Grundschaltungen

HP: www.g-frerichs.de

© Dipl.-Ing. G. Frerichs

Praktiker ist das häufig ein Manko, da die Pin-Belegung der OpAmp's dann einem Datenblatt entnommen werden muss.

Ein OpAmp hat also mindestens 5 Anschlüsse. Für spezielle Ausführungen der OpAmp's sind dann mehrer Anschlüsse erforderlich (z.B. Kompensationsanschlüsse).

2. Grundlagen, Betriebsspannung

Ein OpAmp ist ein Gleichspannungsverstärker, der auch als Wechselspannungsverstärker genutzt werden kann, mit einer großen Spannungsverstärkung. Die interne Schaltung liegt fest, die äußere Beschaltung ist variabel und bestimmt die Eigenschaft der Anwenderschaltung.

Ein OpAmp besteht aus drei Schaltungsblöcken.

- a) Eingangsstufe (Differenzstufe)
- b) Verstärkerstufe
- c) Endstufe



Abb. 1: Blockschaubild innerer Aufbau OpAmp

Die wesentlichen Merkmale eines Operationsverstärkers.

Typische Eigenschaften	Idealer OpAmp	Realer OpAmp
Leerlaufverstärkung $V_0 = \frac{U_A}{U_E}$	$V_0 = \infty$	$V_0 = (20 \text{ bis } 100) \cdot 10^3$
Eingangswiderstand $r_e = \frac{\Delta U_E}{\Delta I_E}$	$r_e = \infty \Omega$	$r_e = 10^6 \Omega \text{ bis } 10^{14} \Omega$
Ausgangswiderstand $r_a = \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A}$	$r_a = 0 \Omega$	$r_a = 30 \Omega \text{ bis } 100 \Omega$
Übertragungsbandbreite $\Delta U = f(T)$	nicht vorhanden	von V abhängig $10^4 \dots 10^7 \text{ Hz}$
Aussteuerbereich $U_A = f(U_E)$	$-\infty \text{ bis } +\infty$	ca 90% von $-U_B$ und $+U_B$

Tabelle 1: Typische Eigenschaften eines OpAmp

Operationsverstärker, Grundlagen-Einführung

2. Grundlagen, Betriebsspannung

a) Grundsaltungen

HP: www.g-frerichs.de

© Dipl.-Ing. G. Frerichs

a) Grundsaltungen

Die Einstellung der Verstärkung hängt nur von der äußern Beschaltung ab. Bei Verstärker-Schaltungen wird der Ausgang immer auf den invertierenden Eingang geschaltet (Gegenkopplung), da eine Mitkopplung nicht erwünscht ist. Eine Mitkopplung führt zur Oszillation.

a) Invertierender OP-Verstärker	b) Nicht-Invertierender OP-Verstärker
<p>Bild 3: Invertierender OpAmp</p> <p><u>Bestimmung der Verstärkung für Bild 3.</u> Die Eingangs-Spannungsmasche ME lautet: $0 = U_E - U_D - U_{R1}$ Die Ausgangs-Spannungsmasche MA lautet: $0 = U_D - U_A - U_{R2}$ Mit der Vereinfachung, dass U_D sehr klein ist und vernachlässigt werden kann, ergibt sich $U_E = U_{R1}$ und $U_A = - U_{R2}$. Da sich Spannungen wie ihre zugehörigen Widerstände verhalten,</p> <p>gilt hier: $\frac{U_A}{U_E} = \frac{-U_{R2}}{U_{R1}} = \frac{-R_2}{R_1} = V$</p> <p>$V = - \frac{R_2}{R_1}$ invertierender Verst.</p>	<p>Bild 4: Nicht-Invertierender OpAmp</p> <p><u>Bestimmung der Verstärkung für Bild 4.</u> Die Eingangs-Spannungsmasche ME lautet: $0 = U_E - U_D - U_{R1}$ Die Ausgangs-Spannungsmasche MA lautet: $0 = U_{R2} + U_{R1} - U_A$ Mit der Vereinfachung, dass U_D sehr klein ist und vernachlässigt werden kann, ergibt sich $U_E = U_{R1}$ und $U_A = U_{R1} + U_{R2}$. Da sich Spgen wie ihre zugehörigen Widerstände verhalten,</p> <p>gilt hier: $\frac{U_A}{U_E} = \frac{U_{R1} + U_{R2}}{U_{R1}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = V$</p> <p>$V = 1 + \frac{R_2}{R_1}$ nicht-invertierender Verst.</p>

Tabelle 2: Erklärung 1, Grundsaltung OpAmp

Operationsverstärker, Grundlagen-Einführung

2. Grundlagen, Betriebsspannung

b) Betriebsspannung

HP: www.g-frerichs.de

© Dipl.-Ing. G. Frerichs

a) Invertierender OP-Verstärker	b) Nicht-Invertierender OP-Verstärker
<p>Der Eingangswiderstand $R_E = \frac{U_E}{I_E}$ wird mit $I_E = \frac{U_{R1}}{R_1}$ und $U_E = U_{R1}$ (siehe oben) zu:</p> $R_E = \frac{U_{R1}}{U_{R1}} R_1 \quad R_E = R_1$ <p>Achtung! Der Eingangswiderstand der invt. Schaltung ist nicht ∞ groß sondern gleich R_1. Mit diesem Widerstand wird eine vorgeschaltete Stufe belastet.</p> <p>R_A wird durch die Schaltung nicht beeinflusst Der Wert entspricht dem Kennwert des OpAmp</p>	<p>Der Eingangswiderstand $R_E = \frac{U_E}{I_E}$ wird mit $I_E = \frac{U_E}{R_{EOp}}$ zu: $R_E = \frac{U_E}{U_E} R_{EOp} \quad R_E = R_{EOp}$</p> <p>Der Eingangswiderstand der Nicht-invertierenden Schaltung ist sehr groß. R_{EOp} ist dem Datenblatt zu entnehmen.</p> <p>Der Ausgangswiderstand der Schaltung wird bestimmt durch den R_A des OpAmp. Siehe Kenndaten im Datenblatt.</p>

Tabelle 3: Erklärung 2, Grundschaltung OpAmp

b) Betriebsspannung

Zur Einstellung des Gleichstrom-Arbeitspunktes ist eine symmetrische Betriebsspannung erforderlich. Symmetrische Betriebsspannung bedeutet, dass von einem Bezugspotenzial (Masse oder Ground) aus, eine positive Spannungsquelle und eine negative Spannungsquelle die OpAmp-Schaltung versorgt. Nur so ist es möglich, dass der OpAmp bei einer Ansteuerung mit „Null“ Volt am Eingang, am Ausgang auch „Null“ Volt auf Masse bezogen hat.

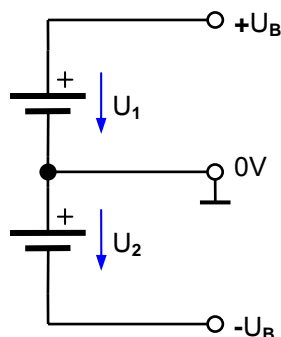


Bild 5: Symmetrische Betriebsspannung mit galvanischen Elementen

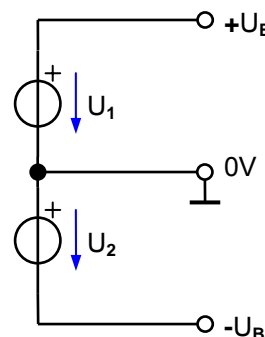


Bild 6: Symmetrische Betriebsspannung mit idealen Spannungsquellen

3. Gleichspannungsverstärker

a) Offsetspannung

Die Angabe von Offset-Spannungen bezieht sich bei Operationsverstärkern auf Eingangsfehlspannungen.

Der ideale Operationsverstärker hat keine Offset-Spannungen.

Der reale Operationsverstärker hat messbare Eingangsfehlspannungen durch den Herstellungsprozess bedingt. Bei der Verstärkung von kleinen Nutzspannungen muss diese Eingangsfehlspannung (Offsetspannung) berücksichtigt bzw. kompensiert werden.

Messen der Offsetspannung an einem OpAmp:

Berechnung der Verstärkung siehe Tabelle 2, nicht-invertierender Verstärker. Die Spannung U_E soll hier Null sein. Es wird die U_A gemessen und daraus die U_{Offs} berechnet.

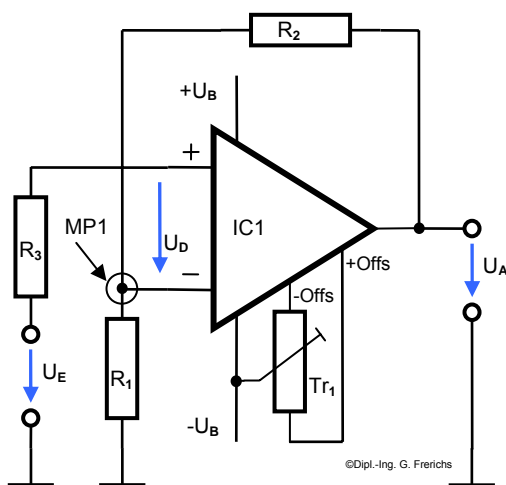


Bild 7: Messen der Offsetspannung

R_3 dient zur Kompensation der Eingangsruhestrome. Unter der Bedingung, dass R_i der Steuerquelle sehr klein ist, gilt die Faustregel:

$$\text{für } V \leq 10 \rightarrow R_3 = \frac{R_1 * R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\text{für } V \geq 10 \rightarrow R_3 = R_1$$

$$Tr_1 = 100 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = 100 \text{ }\Omega$$

$$R_3 = 100 \text{ }\Omega$$

$$R_2 = 10 \text{ k}\Omega$$

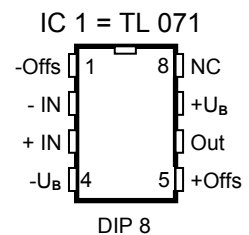


Abb. 2: Sockelbesetzung IC 1

b) Invertierender Verstärker

Die invertierende Verstärkerschaltung dreht die Phase zwischen U_A und U_E um 180° .

Eine positive Eingangsspannung erscheint somit als negative verstärkte Spannung am Ausgang des OpAmp's. Vorteil bei dieser Schaltung ist, dass die Verstärkung auch kleiner als „1“ sein kann. Der Eingangswiderstand hängt von der Beschaltung ab.

Operationsverstärker, Grundlagen-Einführung

3. Gleichspannungsverstärker c) Nicht invertierender Verstärker

HP: www.g-freirichs.de © Dipl.-Ing. G. Freirichs

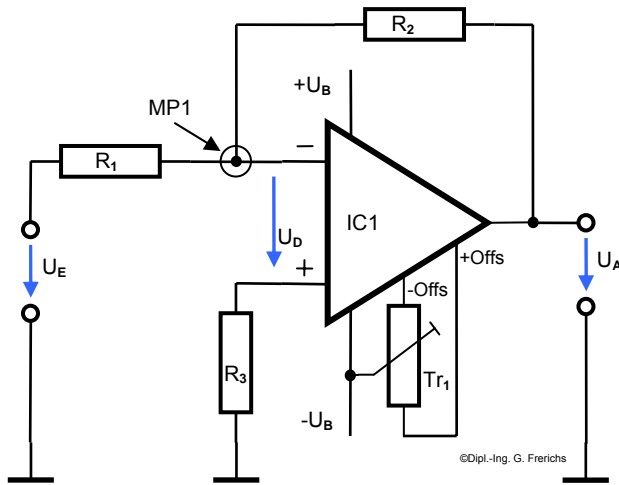


Bild 8: Invertierende OpAmp-Schaltung

R_3 dient zur Kompensation der Eingangsruhestrome. Unter der Bedingung, dass R_1 der Steuerquelle sehr klein ist, gilt die Faustregel:

$$\text{für } V \leq 10 \rightarrow R_3 = \frac{R_1 * R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\text{für } V \geq 10 \rightarrow R_3 = R_1$$

$$Tr_1 = 100 \text{ k}\Omega$$

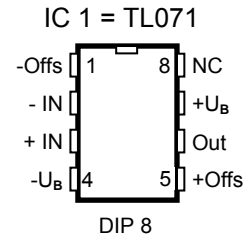


Abb. 3: Sockelbesetzung für IC 1

c) Nicht invertierender Verstärker

Der nicht-invertierende Verstärker verstärkt Eingangsspannungen ohne Phasendrehung. Bei dieser Schaltung kann die Verstärkung nicht kleiner „1“ werden, siehe Tabelle 2. Der Eingangswiderstand der Schaltung ist etwa gleich groß wie der Eingangswiderstand des OpAmp's.

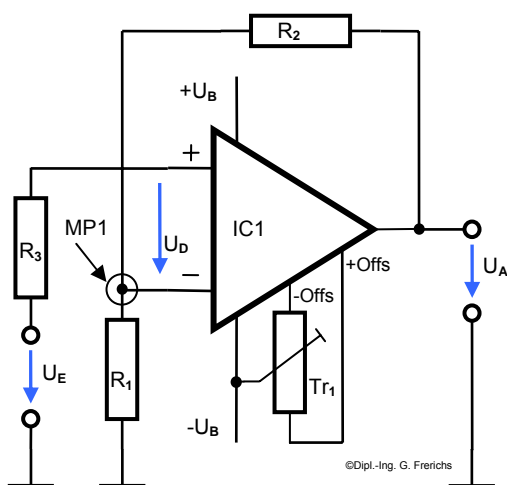


Bild 9: Nicht invertierende OpAmp-Schaltung

R_3 dient zur Kompensation der Eingangsruhestrome. Unter der Bedingung, dass R_1 der Steuerquelle sehr klein ist, gilt die Faustregel:

$$\text{für } V \leq 10 \rightarrow R_3 = \frac{R_1 * R_2}{R_1 + R_2}$$

$$\text{für } V \geq 10 \rightarrow R_3 = R_1$$

$$Tr_1 = 100 \text{ k}\Omega$$

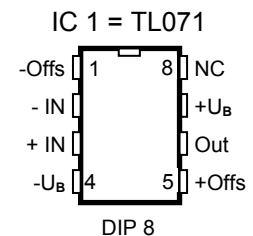


Abb. 4: Sockelbesetzung IC 1

d) Komparator

In der Komparator-Schaltung ist die Verstärkung der Schaltung sehr groß, da keine Gegenkopplung notwendig ist. Das heißt, dass kleine Spannungsunterschiede am Eingang des OpAmp zur Vollaussteuerung am Ausgang des OpAmp führen. Das ist bei dieser Schaltung gewollt. Mit dieser Schaltung können Spannungspegel überwacht werden. Wird ein Referenzspannungspegel über-/unterschritten, so kann der Komparator diesen Zustand entsprechend signalisieren (z.B. mit LED's).

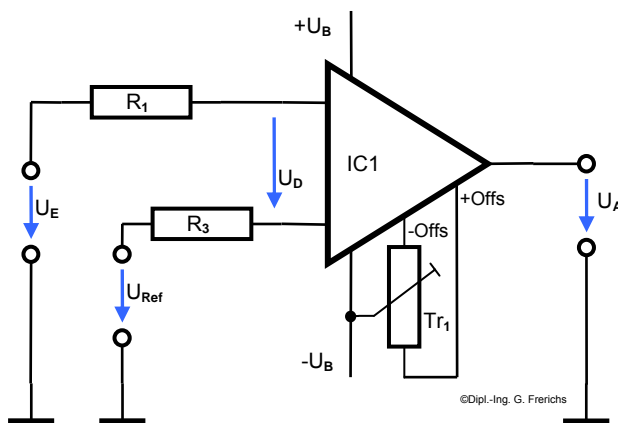


Bild 10: Komparator-Schaltung, allgemein

Die Eingänge in der Schaltung sind hier nicht bezeichnet, da die Angabe aus der Aufgabenstellung der Anwendung erfolgt. Tr_1 wird nicht angeschlossen. $R_1 = R_3 = 10 \text{ k}\Omega$

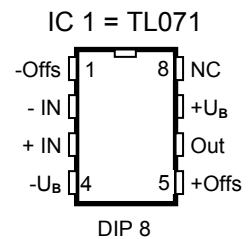


Abb. 5: Sockelbesetzung IC 1

4. Wechselspannungsverstärker

Der Operationsverstärker ist als Gleichspannungsverstärker konzipiert. Um den OpAmp auch als Wechselspannungsverstärker zu nutzen, muss folgendes berücksichtigt werden. Ohne Rückkopplung ist die obere Grenzfrequenz recht niedrig, bei maximaler Verstärkung des OpAmp, nur ca. 1kHz. Verringert man die Verstärkung des OpAmp, so erreicht man größere Bandbreiten. Die obere Grenzfrequenz f_{go} berechnet sich zu: $f_{go} = f_T / V$, f_T ist die Transitfrequenz eines OpAmp, die im Datenblatt für eine Verstärkung von $V = 1$ angegeben wird.

a) RC-Filter

$$R_V = 22 \text{ k}\Omega$$

$$Tr_1 = 100 \text{ k}\Omega$$

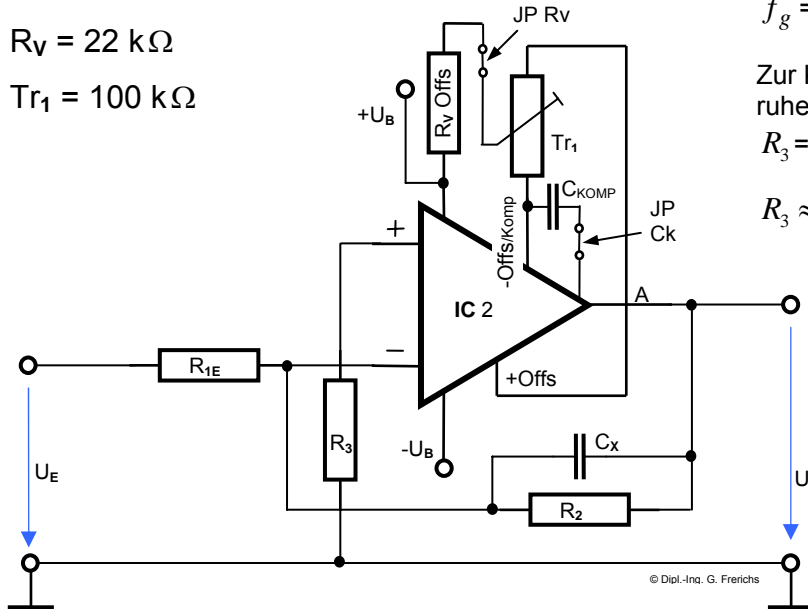


Bild 11: Schaltung RC-Filter

Die Grenzfrequenz für dieses 1-stufige RC-Filter errechnet sich wie folgt:

$$f_g = \frac{1}{2\pi \cdot R_2 \cdot C_X} ; \quad V = - \frac{R_2}{R_{1E}}$$

Zur Kompensation des Eingangsruhestromes:

$$R_3 = R_{1E} \text{ für } V \geq 10$$

$$R_3 \approx \frac{R_{1E} \cdot R_2}{R_{1E} + R_2} \text{ für } V \leq 10$$

IC 2 = NE5534

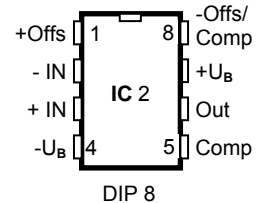


Abb. 6: Sockelbeschriftung IC 2

b) NF-Verstärker

$$R_V = 22 \text{ k}\Omega$$

$$Tr_1 = 100 \text{ k}\Omega$$

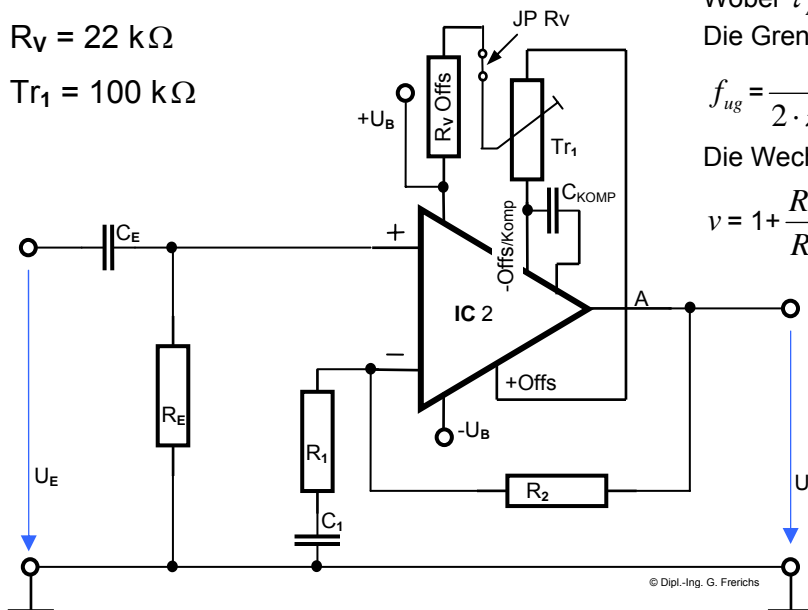


Bild 12: Schaltung eines NF-Verstärkers mit OpAmp

Zur Kompensation der Eingangsströme soll $R_2 \approx R_E$ sein.

Die untere Grenzfrequenz wird bestimmt durch: $\tau_E = R_E \cdot C_E$ und $\tau_A = (R_1 + R_2) \cdot C_1$

Wobei $\tau_A = 10 \tau_E$ sein sollte.

Die Grenzfrequenz berechnet sich z.B. aus:

$$f_{ug} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_E \cdot C_E}$$

Die Wechselspannungsverstärkung ist:

$$v = 1 + \frac{R_2}{R_1} ; \quad v = 10^{\frac{V_{dB}}{20}} ; \quad V_{dB} = 20 \log \frac{U_A}{U_E}$$

IC 2 = NE5534

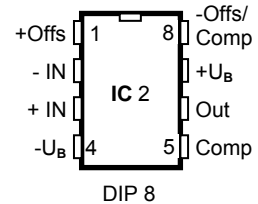


Abb. 7: Sockelbeschriftung IC 2

Bei dieser Schaltung wird der OpAmp gleichstromseitig voll gegengekoppelt, die Gleichstromverstärkung beträgt somit „1“. Allerdings bestimmen jetzt die Bauelemente C_E , R_E und C_1 , R_1 das Frequenzverhalten der Schaltung. Die

Wechselspannungsverstärkung beträgt: $v = 1 + \frac{R_2}{R_1}$; $v = 10^{\frac{V_{dB}}{20}}$; $V_{dB} = 20 \log \frac{U_A}{U_E}$

Diese Schaltung kann auch mit einer unsymmetrischen Spannungsquelle betrieben werden, wenn der Eingang auf die Mitte der Versorgungsspannung eingestellt wird. Der Ausgang folgt dann dieser Einstellung und liegt auf der Mitte der Versorgungsspannung. Je nach weiterer Beschaltung des Ausgangs kann auch hier zum Auskoppeln des Wechselspannungssignals ein Kondensator erforderlich sein.

Dazu gibt es auch Sonderformen für OpAmp's, die speziell für Wechselspannungsanwendungen erstellt wurden. LM 386 ist z.B. ein kleiner NF-Leistungsverstärker, der in vielen Anwendungen (Kopfhörerverstärker usw.) verwendet wird.

5. Simulation elektronischer Schaltungen

Simulation einer Elektronikschaltung mit Spice, was bedeutet der Begriff Spice?:

(SPICE: Simulation Program with Integreted Circuits Emphasis)

Verwendet wird hier das Simulationsprogramm der Firma INTUSOFT, ICAP/4Windows.

Die Demoversion ist kostenlos und für einfache Simulationsaufgaben ausreichend.

Bezug: www.thomatronik.de oder www.daryan.de

a) Einführung

Die Simulations-Software berechnet elektronische Schaltungen nach den Gesetzen der Kirchhoffschen Regeln für Stromknoten und Spannungsmaschen.

Das Programm ICAP/4 besteht aus 3 Hauptteilen

- SpiceNet
- IsSpice
- IntuScope

SpiceNet

CAD – Programm zum Erstellen der Schaltung / Zeichnung

- Festlegen aller Variablen z.B. R, C, V usw.
- Festlegen aller Größen für die Ausgabe der Simulationsergebnisse
- Knotenpunkte werden automatisch mit entsprechender Nummerierung versehen
- Speichern aller Angaben
- Dokumentation der Schaltung

IsSpice

Programmteil zum Simulieren der in SpiceNet erstellten Schaltung

- In diesem Programmteil läuft nach dem Start der Simulationsanweisung die Simulation automatisch ab.
- Die Ergebnisse werden vom Programm in dem Ordner abgelegt, der zum Speichern der SpiceNet-Zeichnung ausgewählt wurde.

IntuScope

Software-Oszilloskop, in dem Simulationsergebnisse dargestellt werden können

- Alle zeit- und frequenzabhängigen Größen können hier als Graphen dargestellt werden.
- Alle Graphen werden hier vermessen und ausgewertet.
- Dokumentation der Graphen.

b) Simulationsarten

- DC-Analyse
Analyse aller Gleich-strom/spannungswerte, mit OP-Anweisung in die Schaltung unter SpiceNet einblenden.
- AC-Analyse,
Analyse der Wechsel-strom/spannungsgrößen, des Frequenzgangs
Kleinsignalanalyse abhängig von der Frequenz.
- TRAN-Analyse,
Analyse der Schaltung in Abhängigkeit der Zeit
Einschaltmoment ($t=0$) bis , -nach Vorgabe im Simulations-Setup

c) Allgemeine Hinweise

Generatoren, R_i einfügen, sonst ist $R_i = 0$ Ohm (ideal)

Koppel-Kondensatoren bzw. alle Bauelemente, müssen in eine Masche eingebunden sein!

Spice Maßstabfaktoren, Zehnerpotenzen mit folgenden Buchstaben benennen:

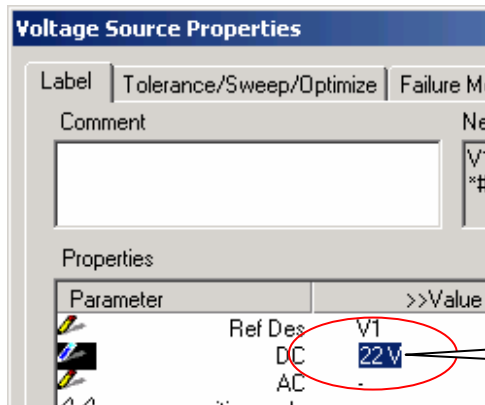
Groß- oder Kleinschreibung hat keine Bedeutung!

$10^{-12} = p$ (P)	$10^{-3} = m$ (M)
$10^{-9} = n$ (N)	$10^3 = k$ (K)
$10^{-6} = u$ (U)= μ	$10^6 = meg$ (Meg)

Tabelle 4: Kürzel für Zehnerpotenzen

Für Werte-Angaben mit Kommastellen, ist darauf zu achten, dass ein **Punkt** anstelle eines Kommas gesetzt wird!

Bei der Eingabe einer gewünschten Spannung für einen Generator (Voltage Source) muss folgendes beachtet werden:



Für DC oder AC muss **kein** Buchstabe „V“ eingegeben werden. Falls es doch vorgenommen wird, darf auf **keinen** Fall zwischen dem Zahlenwert und dem Buchstaben ein Leerzeichen stehen. Ein Leerzeichen führt ohne Fehlermeldung dazu, dass die Simulation **nicht** läuft!

Bild 13: Werte-Eingabe in Properties

Das ist auch bei der **Eingabe von Bauteilwerten** zu beachten! Also, 3.9 n ist falsch eingegeben, **richtig ist 3.9n**, es darf **kein** Leerzeichen zwischen Zahlenwert und Zehnerpotenz vorkommen!

Richtig ist: 3.9n.

Zum Speichern einen **eigenen Ordner** einrichten, da Spice etliche Datensätze anlegt.

d) Simulation einer Einweg-Gleichrichterschaltung

Die Schaltungsunterlagen und die Beschreibung zu diesem Punkt sind dem Link: Einführung in die Bedienung des Simulationsprogramms ..., zu entnehmen (siehe Literatur).

6. Literatur

- Bauelemente und Grundschaltungen der Mikroelektronik
Pflaum Verlag München, ISBN 3-7905-0900-0
- Internet: www.elektronik-kompodium.de
- SPICE: ICAP/4-Demo, www.daryan.de, www.thomatronik.de, www.intusoft.com
- Einführung in die Bedienung des Simulationsprogramms ICAP/4 für Windows,
<http://www.g-frerichs.de/Start-Frameset/BeschrSpice-FRSmitAufg.pdf>