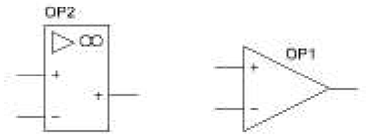
Operationsverstärker

<u>Schaltsymbole</u>



- in der Regel zeichnet man die Versorgungsspannung nicht mit ins Schaltsymbol mit ein
  ➔ Versorgung mit positiver und negativer Spannung mit gemeinsamem Nullpunkt
- Spannungen sind immer auf GND bezogen
- Eingänge:
  - + = nicht invertierender Eingang
  - - = invertierender Eingang
  - können in den Schaltbildern vertauscht werden (wegen Übersichtlichkeit, Funktionsweise)

<u>Funktionsprinzip</u>
- bildet die Differenz zwischen den beiden Eingängen und verstärkt diese

<u>Spannungen am OP</u>

U_D = Differenzspannung zwischen den Eingängen

U_{I1} = Spannung am nicht invertierenden Eingang

U_{I2} = Spannung am invertierenden Eingang

U_Q = Ausgangsspannung

V_{D0} = Differenzspannungsverstärkung $= \frac{U_Q}{U_D} = \frac{Ausgangsspannung}{Eingangsdifferenzspannung}$

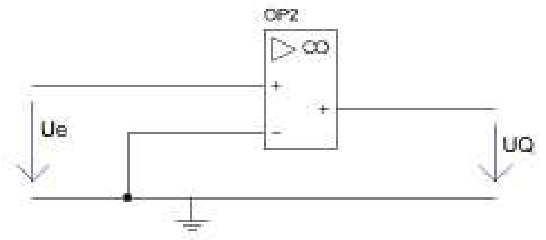
$$U_D = U_{I1} - U_{I2}$$
$$U_Q = V_{D0} \cdot U_D$$

- V_{D0} ist ein Bauteilmerkmal von OPs (Datenblattwert)
- V_{D0} ist typischerweise sehr groß $10^4 ... 10^6 \approx 80dB ... 120dB$
- Umrechnung in dB: $20 \cdot \lg(V_{D0})$

<u>Slew-Rate</u>
- Geschwindigkeit des Spannungsanstiegs beim OP → weiteres Merkmal des OPs
- es gibt langsame (billige) und schnelle OPs

Anwendungsmöglichkeiten

- Eingangssignal U_e an den nicht invertierenden Eingang und 0V(GND) an den invertierenden Eingang



$$U_D = U_{I1} - U_{I2} \qquad mit\ U_{I1} = U_e, U_{I2} = 0V$$
$$U_D = U_e - 0V = U_e$$
$$U_Q = V_{D0} \cdot U_D = V_{D0} \cdot U_e$$

Zahlenbeispiel:

$$V_{D0} = 10^5 \quad (OP741)$$
$$\hat{U}_e = 10mV$$
$$U_Q = 10 \cdot 10^{-3} V \cdot 10^5 = 1000V$$

Bemerkung: 1000V werden wegen der Aussteuergrenze, die durch U_B^+ und U_B^- festgelegt wird nicht erreicht.

Aussteuergrenze

- zwischen den Grenzen fast linearer Verlauf
- wegen hohem V_{D0} liegen die Grenzen der Eingangsdifferenzspannung im µV-Bereich
- Ausgangsspannung erreicht U_B^+ / U_B^- nicht, z.B. bis 10V bei $U_B^+ / U_B^- = \pm 12V$
- Übertreten der Grenzen für U_e ist nicht schädlich für den OP → Betrieb bei Aussteuergrenze ist nichts Ungewöhnliches

Invertierender Verstärker mit Gegenkopplung

Beispielauslegung:

$$R_1 = 10k\Omega$$
$$R_2 = 20k\Omega$$
$$V_{D0} = 10000$$
$$U_I = 0V$$
$$r_e = 1000M\Omega$$
$$U_B - Bereich = \pm 10V$$

Um zu zeigen, wie sich der OP bei ansteigendem U_I verhält, werden nun Zustandsuntersuchungen durchgeführt:

Zustand 1: $U_I = 3V, U_Q = 0V, I_N \approx 0A$

In diesem Fall ist ein Rechteckimpuls von 3V Amplitude auf den Eingang geschaltet worden, am Ausgang liegen allerdings noch 0V (→ Slew Rate)

Man betrachtet nun den Spannungsteiler aus R_1 und R_2, was durch die Annahme $I_N \approx 0A$ möglich wird

$$U_{R2} = \left(U_I - U_Q\right) \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \left(3V - 0V\right) \cdot \frac{20k\Omega}{30k\Omega} = 2V$$
$$U_{I2} = U_{R2} + U_Q = 0V + 2V = 2V$$
$$U_D = U_{I1} - U_{I2} = 0 - 2V = -2V$$

Zustand 2: $U_Q = -3V$

Die Berechnungen am Spannungsteiler werden für alle folgenden Schritte genauso wie in Zustand 1 durchgeführt.

$$U_{R2} = \left(U_I - U_Q\right) \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \left(3V - (-3V)\right) \cdot \frac{20k\Omega}{30k\Omega} = 4V$$
$$U_{I2} = U_{R2} + U_Q = 4V + \left(-3V\right) = 1V$$
$$U_D = U_{I1} - U_{I2} = 0 - 1V = -1V$$

Zustand 3: $U_Q = -5,7V$

$$U_{R2} = \left(U_I - U_Q\right) \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \left(3V - (-5,7V)\right) \cdot \frac{20k\Omega}{30k\Omega} = 5,8V$$
$$U_{I2} = U_{R2} + U_Q = 5,8V + \left(-5,7V\right) = 0,1V$$
$$U_D = U_{I1} - U_{I2} = 0 - 0,1V = -0,1V$$

Zustand 4: $U_Q = -5,97V$

$$U_{R2} = \left(U_I - U_Q\right) \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \left(3V - (-5,97V)\right) \cdot \frac{20k\Omega}{30k\Omega} = 5,98V$$
$$U_{I2} = U_{R2} + U_Q = 5,98V + \left(-5,97V\right) = 0,01V$$
$$U_D = U_{I1} - U_{I2} = 0 - 0,01V = -0,01V = -10mV$$

- ➔ Bei $\approx 6V$ geht der OP nicht weiter in die Richtung der negativen Aussteuerungsgrenze
- ➔ U_D wird immer kleiner
- ➔ Verstärkungsfaktor wird über die Widerstände geregelt → $\frac{R_2}{R_1} = \frac{20k}{10k} = 2$ → daher wird bis zu -6V gefahren

In welchem Zusammenhang stehen R_1, R_2, U_I und U_Q beim invertierenden Verstärker?

Es gilt:

$$I.\ U_Q = U_D \cdot V_{D0} \Rightarrow U_D = \frac{U_Q}{V_{D0}}$$

Annahme: Mit $I_N = 0A$ (kein Strom in den OP) ergibt sich ein Spannungsteiler aus R_1, R_2

$$II.\ \ U_{I2} = \left(U_I - U_Q\right) \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} + U_Q$$

$III.\ U_D = U_{I1} - U_{I2}$ mit $U_{I1} = 0V$ folgt $U_D = -U_{I2}$ bzw. $-U_D = U_{I2}$

$III.\ in\ II.$

$$\Rightarrow -U_D = \left(U_I - U_Q\right) \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} + U_Q$$

$I.\ einsetzen$

$$-\frac{U_Q}{V_{D0}} = \left(U_I - U_Q\right) \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} + U_Q$$

Diese Gleichung muss nun so umgestellt werden, dass sich $V_U = \dfrac{Ausgangsspannung}{Eingangsspannung}$ ergibt

Umformen der Gleichung ergibt:

$$\Rightarrow V_U = \frac{R_2}{\frac{R_1 + R_2}{V_{D0}} + R_1} = \frac{U_Q}{U_I}$$

Wenn $V_{D0} \gg \left(R_1 + R_2\right)$, dann ergibt sich

$$\Rightarrow V_U = -\frac{R_2}{R_1}$$

Aus der Definition $V_U = \dfrac{U_Q}{U_I}$ bzw. $U_Q = V_U \cdot U_I$ und der Beziehung $U_Q = U_D \cdot V_{D0}$ ergibt sich

$$V_U \cdot U_I = U_D \cdot V_{D0} \Leftrightarrow U_D = \frac{V_U \cdot U_I}{V_{D0}}$$

Da V_{D0} sehr groß ist und häufig als ∞ angenommen wird, gilt $U_D \approx 0V$ (Annahme!!)

- ➔ Solange der OP außerhalb der Aussteuergrenze arbeitet, zieht er das Potenzial U_D auf 0V!
- ➔ Gegenkopplung: Es wird etwas vom Ausgang zurückgeführt (gekoppelt)

Zahlenbeispiel:
$R_1 = 10k\Omega, R_2 = 47k\Omega, U_D = 0V, U_e = 1V$

$$I_1 = \frac{U_e}{R_1} = \frac{1V}{10k\Omega} = 0{,}1mA = 100\mu A$$
$$I_1 = I_2 = 100\mu A\left(weil\ \ I_N = 0A\right)$$
$$U_{R2} = I_2 \cdot R_2 = I_1 \cdot R_2 = 100\mu A \cdot 47k\Omega = 4{,}7V$$
$$U_Q = -U_{R2} = -4{,}7V$$

➔ Maschenumlauf beachten (muss 0 ergeben!!)

Zahlenbeispiel 2: Erweiterung der Schaltung um eine Spannungsquelle am nicht invertierenden Eingang ($U_{n.inv.} = 3V$)

Der OP gleicht die Differenzspannung auf 0V aus, daher liegt am invertierten Eingang ein 3V Potenzial an.

$$I_1 = \frac{2V}{10k\Omega} = 200\mu A$$ (Achtung: Pfeile umdrehen!!)
$$I_1 = I_2 = 200\mu A$$
$$U_{R2} = I_2 \cdot R_2 = 200\mu A \cdot 47k\Omega = 9{,}4V$$
$$-U_{R2} + U_Q - 3V + U_D = 0$$
$$\Rightarrow U_Q = U_{R2} + 3V = 9{,}4V + 3V = 12{,}4V$$

Auslegung der Widerstände:

- Begrenzung durch $I_{a\max}$, maximaler Ausgangsstrom des OP
- Begrenzung durch maximale Ausgangsspannung $U_{Q\max}$

Beispiel für die Auslegung der Widerstände:
$I_{a\max} = 10mA, U_{Q\max} = 10V\left(Aussteuergrenze\right) \rightarrow aus\ dem\ Datenblatt$

1. Fall: $R_L \rightarrow \infty \left(\Rightarrow I_2 = 0\right)$

   $I_a = I_2$ darf nicht größer werden als $I_{a\max}$

   R_2 liegt zwischen Ausgang ($U_{Q\max}$) und 0V → $I_{2\max} = \frac{U_{Q\max}}{R_2} < I_{a\max}$

   ➔ für das Beispiel: $\frac{10V}{R_2} < 10mA \Rightarrow R_2 > 1k\Omega$

   ➔ Die maximalen Werte treten auf bei $U_a = U_{a\max}$

2. Fall: $R_L = 2k\Omega$

$I_a = I_2 + I_L$

➔ Die maximalen Werte treten auf bei $U_a = U_{a\max}$

$I_{2\max} = \dfrac{U_{Q\max}}{R_2},\ I_{L\max} = \dfrac{U_{Q\max}}{R_L}$

Es muss immer gelten:

$$I_{a\max} > I_2 + I_L = I_a \Rightarrow I_{a\max} > \frac{U_{Q\max}}{R_2} + \frac{U_{Q\max}}{R_L} \Rightarrow R_2 > \frac{U_{Q\max}}{I_{a\max} - \frac{U_{Q\max}}{R_L}}$$

Für das Beispiel gilt:

$$R_2 > \frac{10V}{10mA \cdot \frac{10V}{2k\Omega}} \Rightarrow R_2 > 2000\Omega$$

➔ obere Grenze für R_2 ergibt sich aus der Formel für V_U

$$V_U = \frac{R_2}{\frac{R_1 + R_2}{V_{D0}} + R_1}$$

Das V_{D0} wurde mit ∞ angenommen, was bei den Werten im Megaohmbereich nicht mehr passend ist, weil man beim Einsetzen keinen vernachlässigbaren Wert mehr erhält

➔ üblicher Bereich für $R_2 \Rightarrow 10k\Omega ... 500k\Omega$

<u>Frequenzverhalten von Operationsverstärkern</u>

- OPs haben Tiefpassverhalten → Flankensteilheit 20dB/Dekade
- typische Grenzfrequenz ohne Gegenkopplung → $f_g = 10Hz$
- Transitfrequenz f_T → Verstärkung 0dB → $V_{D0} = 1$ (Datenblattwert)
  - ➔ Durch Gegenkopplung wird eine über einen weiten Frequenzbereich konstante Verstärkung erreicht
  - ➔ f_g verschiebt sich durch Gegenkopplung nach oben → Verstärkungsgraph kann anhand des Graphen für den Fall ohne Gegenkopplung ermittelt werden
- Es gilt:

  $f_T = |V_U| \cdot f_g = const.$

  ohne Gegenkopplung $|V_U| = V_{D0}$, z.B. $V_{D0} = 100000 \mathrel{\hat{=}} 100dB,\ f_g = 10Hz$

  ➔ $f_T = 100000 \cdot 10Hz = 1MHz$

  mit Gegenkopplung:

  ➔ $f_T = 1000 \cdot 1kHz = 1MHz$

  ➔ man kann mit Hilfe von f_T und $|V_U|$ die Grenzfrequenz ermitteln $f_g = \dfrac{f_T}{|V_U|}$

  ➔ man kann mit Hilfe von f_T und f_g die Spannungsverstärkung ermitteln $|V_U| = \dfrac{f_T}{f_g}$