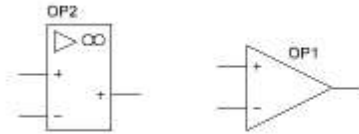


Operationsverstärker

Schaltsymbole



- 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:
 - o + = nicht invertierender Eingang
 - o - = invertierender Eingang
 - o können in den Schaltbildern vertauscht werden (wegen Übersichtlichkeit, Funktionsweise)

Funktionsprinzip

- bildet die Differenz zwischen den beiden Eingängen und verstärkt diese

Spannungen am OP

U_D = Differenzspannung zwischen den Eingängen

U_{I1} = Spannung am nicht invertierenden Eingang

U_{I2} = Spannung am invertierenden Eingang

U_Q = Ausgangsspannung

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

$$U_D = U_{I1} - U_{I2}$$

$$U_Q = V_{D0} \cdot U_D$$

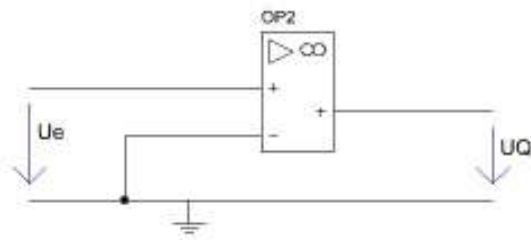
- V_{D0} ist ein Bauteilmerkmal von OPs (Datenblattwert)
- V_{D0} ist typischerweise sehr groß $10^4 \dots 10^6 \approx 80dB \dots 120dB$
- Umrechnung in dB: $20 \cdot \lg(V_{D0})$

Slew-Rate

- 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



$$U_D = U_{I1} - U_{I2} \quad \text{mit } U_{I1} = U_e, U_{I2} = 0V$$

$$U_D = U_e - 0V = U_e$$

$$U_Q = V_{D0} \cdot U_D = V_{D0} \cdot U_e$$

Zahlenbeispiel:

$$V_{D0} = 10^5 \quad (\text{OP741})$$

$$\hat{U}_e = 10\text{mV}$$

$$U_Q = 10 \cdot 10^{-3}\text{V} \cdot 10^5 = 1000\text{V}$$

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

Aussteuergränze

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

Invertierender Verstärker mit Gegenkopplung

Beispielauslegung:

$$R_1 = 10\text{k}\Omega$$

$$R_2 = 20\text{k}\Omega$$

$$V_{D0} = 10000$$

$$U_I = 0\text{V}$$

$$r_e = 1000\text{M}\Omega$$

$$U_B - \text{Bereich} = \pm 10\text{V}$$

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 (\rightarrow Slew Rate)

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

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

$$U_{I2} = U_{R2} + U_Q = 0V + 2V = 2V$$

$$U_D = U_{I1} - U_{I2} = 0 - 2V = -2V$$

Zustand 2: $U_Q = -3V$

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

$$U_{R2} = (U_I - U_Q) \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = (3V - (-3V)) \cdot \frac{20k\Omega}{30k\Omega} = 4V$$

$$U_{I2} = U_{R2} + U_Q = 4V + (-3V) = 1V$$

$$U_D = U_{I1} - U_{I2} = 0 - 1V = -1V$$

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

$$U_{R2} = (U_I - U_Q) \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = (3V - (-5,7V)) \cdot \frac{20k\Omega}{30k\Omega} = 5,8V$$

$$U_{I2} = U_{R2} + U_Q = 5,8V + (-5,7V) = 0,1V$$

$$U_D = U_{I1} - U_{I2} = 0 - 0,1V = -0,1V$$

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

$$U_{R2} = (U_I - U_Q) \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = (3V - (-5,97V)) \cdot \frac{20k\Omega}{30k\Omega} = 5,98V$$

$$U_{I2} = U_{R2} + U_Q = 5,98V + (-5,97V) = 0,01V$$

$$U_D = U_{I1} - U_{I2} = 0 - 0,01V = -0,01V = -10mV$$

\rightarrow Bei $\approx 6V$ geht der OP nicht weiter in die Richtung der negativen Aussteuerungsgrenze

\rightarrow U_D wird immer kleiner

\rightarrow Verstärkungsfaktor wird über die Widerstände geregelt $\rightarrow \frac{R_2}{R_1} = \frac{20k}{10k} = 2 \rightarrow$ 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

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

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

III. in II.

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

I. einsetzen

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

Diese Gleichung muss nun so umgestellt werden, dass sich $V_U = \frac{\text{Ausgangsspannung}}{\text{Eingangsspannung}}$ 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 $V_{D0} \gg (R_1 + R_2)$, dann ergibt sich

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

Aus der Definition $V_U = \frac{U_Q}{U_I}$ 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 Aussteuergerne arbeitet, zieht er das Potenzial U_D auf 0V!
- ➔ Gegenkopplung: Es wird etwas vom Ausgang zurückgeführt (gekoppelt)

Zahlenbeispiel:

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

$$I_1 = \frac{U_e}{R_1} = \frac{1V}{10k\Omega} = 0,1mA = 100\mu A$$

$$I_1 = I_2 = 100\mu A \text{ (weil } I_N = 0A)$$

$$U_{R2} = I_2 \cdot R_2 = I_1 \cdot R_2 = 100\mu A \cdot 47k\Omega = 4,7V$$

$$U_Q = -U_{R2} = -4,7V$$

→ 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.

$$I_1 = \frac{2V}{10k\Omega} = 200\mu A \text{ (Achtung: Pfeile umdrehen!!)}$$

$$I_1 = I_2 = 200\mu A$$

$$U_{R2} = I_2 \cdot R_2 = 200\mu A \cdot 47k\Omega = 9,4V$$

$$-U_{R2} + U_Q - 3V + U_D = 0$$

$$\Rightarrow U_Q = U_{R2} + 3V = 9,4V + 3V = 12,4V$$

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:

$$I_{a,max} = 10mA, U_{Q,max} = 10V \text{ (Aussteuergrenze)} \rightarrow \text{aus dem Datenblatt}$$

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

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

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

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

$$\rightarrow \text{Die maximalen Werte treten auf bei } U_a = U_{a,max}$$

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

$$I_a = I_2 + I_L$$

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

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

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 Megahombereich nicht mehr passend ist, weil man beim Einsetzen keinen vernachlässigbaren Wert mehr erhält

→ üblicher Bereich für $R_2 \Rightarrow 10k\Omega \dots 500k\Omega$

Frequenzverhalten von Operationsverstärkern

- 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. $V_{D0} = 100000 \hat{=} 100dB$, $f_g = 10Hz$

$$\Rightarrow f_T = 100000 \cdot 10Hz = 1MHz$$

mit Gegenkopplung:

$$\Rightarrow f_T = 1000 \cdot 1kHz = 1MHz$$

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

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