

E29 Operationsverstärker

Grundlagen

Ein Operationsverstärker (OPV) ist im Wesentlichen ein Differenzverstärker. Er hat einen invertierenden (U_{E-}) sowie einen nichtinvertierenden Eingang (U_{E+}), welche zusammen den Differenzeingang bilden. Da sowohl positive wie auch negative Ein- und Ausgangsspannungen möglich sind, müssen OPVs mit einer symmetrischen Spannungsquelle $\pm U_B$ ¹ betrieben werden.

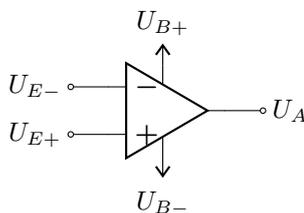


Abbildung 1: Schaltbild eines OPV

Die Ausgangsspannung U_A ergibt sich idealerweise mit der Leerlaufverstärkung v_0 des OPVs zu $U_A = v_0(U_{E+} - U_{E-})$.

Die Leerlaufverstärkung eines idealen OPVs geht gegen unendlich² und ist unabhängig von der Frequenz sowie reell,³ die Eingangswiderstände sind unendlich groß und der Ausgangswiderstand ist Null.

Neben den beim realen OPV nicht verwirklichtbaren genannten Eigenschaften treten noch Nullpunktsfehler und Gleichtaktfehler in Erscheinung.

Der Nullpunktsfehler wird durch die Offsetspannung beschrieben. Diese ist die Spannungsdifferenz, welche am Eingang des OPVs anliegen müsste, damit am Ausgang des OPVs keine Spannung anliegt. Eine Offsetkorrektur ist in praktischen Anwendungsfällen meist unumgänglich. Eine entsprechende Schaltung ist in den meist als integrierte Schaltung aufgebauten OPVs oftmals enthalten. Trotz erfolgtem Nullpunktsabgleich treten am Ausgang des OPVs Spannungen in Abhängigkeit der an beiden Eingängen gemeinsam anliegenden Spannung auf. Das Verhältnis aus der Verstärkung von Differenzspannungen v_D zur Verstärkung bzw. der Dämpfung v_G dieser Gleichtaktspannung U_E wird Gleichtaktunterdrückung⁴ genannt⁵.

Auf Grund der hohen Verstärkung führen kleinste Eingangsspannungen zum vollen Aussteuern des Ausgangs bis

¹oft ± 15 V

²Realistische Werte liegen im Bereich von 100 dB

³Die Phasenverschiebung zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung ist für den nichtinvertierenden Eingang 0° , für den invertierenden Eingang 180°

⁴common mode rejection ratio CMRR

⁵Da die Gleichtaktunterdrückung üblicherweise, so wie auch Verstärkungen oder Dämpfungen logarithmisch in dB angegeben werden, folgt einfach $CMRR/\text{dB} = v_D/\text{dB} - v_G/\text{dB}$

knapp unter die Betriebsspannung. Die extrem steile Kennlinie ist für die meisten Anwendungen nicht geeignet. Außerdem ist die reale Leerlaufverstärkung sehr stark frequenzabhängig, sie ist näherungsweise der Frequenz f umgekehrt proportional.

$$v_0 = \frac{B}{f} \quad (1)$$

Demzufolge ist das Verstärkungs-Bandbreite-Produkt B eine Konstante und eine wichtige Kenngröße von OPVs.

Durch eine äußere Beschaltung können die Verstärkereigenschaften entscheidend beeinflusst werden.

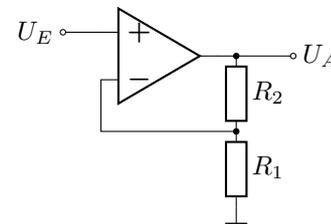


Abbildung 2: nichtinvertierender Verstärker

In der Abbildung 2 ist die Schaltung eines nichtinvertierenden Verstärkers dargestellt. Durch den aus R_1 und R_2 gebildeten Spannungsteiler wird die Spannung $U_A \cdot R_1 / (R_1 + R_2)$ auf den invertierenden Eingang gegengekoppelt, so dass die Ausgangsspannung

$$U_A = v_0 \left(U_E - U_A \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \quad (2)$$

beträgt. Für die Verstärkung $v = U_A / U_E$ der Schaltung folgt für große v_0 unmittelbar

$$v = 1 + \frac{R_2}{R_1}. \quad (3)$$

Da die Eingangsspannung direkt am nichtinvertierenden Eingang des OPV anliegt, ist der Eingangswiderstand der Schaltung gleich dem Eingangswiderstand des OPV und damit extrem groß. Ohne den Widerstand R_1 wird die Verstärkung gerade 1 und die Schaltung kann als Spannungsfolger mit extrem kleinem Ausgangswiderstand benutzt werden. Neben Anwendungen in Eingangsstufen von Messgeräten eignet sich der Spannungsfolger auch als Konstantspannungsquelle. Dazu wird an den Eingang die Spannung einer Zenerdiode oder besser eines Bandgapreferenz-Bauelementes gelegt. Diese wird praktisch nicht belastet und ist damit sehr stabil. Der Ausgang des OPV stellt eine ideale Spannungsquelle⁶ dar, so dass Laständerungen keinen Einfluss auf die Ausgangsspannung haben.

⁶praktisch ohne Innenwiderstand

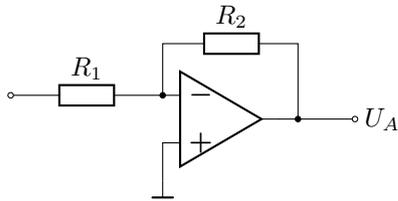


Abbildung 3: invertierender Verstärker

Beim invertierenden Verstärker in Abbildung 3 wird der nichtinvertierende Eingang auf Massepotenzial gelegt und die Eingangsspannung U_E über den Widerstand R_1 zugeführt. Die Spannung am nichtinvertierenden Eingang ist auf Grund der hohen Leerlaufverstärkung $v_0 \rightarrow \infty$ identisch mit der Spannung am invertierenden Eingang Null.⁷ Da in den Eingang U_{E-} des OPVs praktisch kein Strom fließt, muss

$$I_E = \frac{U_E}{R_1} = -\frac{U_A}{R_2} \quad (4)$$

gelten, so dass

$$v = -\frac{R_2}{R_1}. \quad (5)$$

gilt. An den invertierenden Eingang können ohne gegenseitige Beeinflussung beliebig viele weitere Spannungen über zusätzliche Widerstände angelegt werden. Diese werden entsprechend dem jeweiligen Widerstandsverhältnis unabhängig voneinander verstärkt und somit gewichtet addiert.

Überbrückt man den Widerstand R_1 , verhält sich der Eingang der Schaltung wie ein Kurzschluss. Entsprechend (4) gilt für die Ausgangsspannung $U_A = -I_E R_2$, was der Charakteristik eines idealen Strom-Spannungswandlers entspricht.

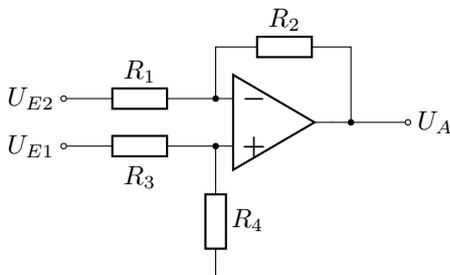


Abbildung 4: Differenzverstärker

Einen Differenzverstärker erhält man, wenn dem nichtinvertierenden Eingang wie in Abbildung 4 eine weitere Spannung über den Spannungsteiler R_3, R_4 zugeführt wird. Für $R_3 = R_1$ und $R_4 = R_2$ beträgt die Ausgangsspannung

$$U_A = \frac{R_2}{R_1}(U_{E1} - U_{E2}), \quad (6)$$

ist also direkt proportional zur Differenz der Eingangsspannung.

Versuchsvorbereitung

- Spannungsteiler, Hoch- und Tiefpass, Bandpass

⁷Man spricht von virtueller Masse.

- Verstärkung in dB, Grenzfrequenz, Bandbreite
- Spannungsstabilisierung mit Zenerdiode
- Entwerfen Sie eine Schaltung, die die Funktion $U_A = 10U_{E1} + 2U_{E2}$ realisiert.
- Vor- und Nachteile von Gegenkopplungen

Aufgaben

- Bauen Sie einen nichtinvertierenden Verstärker auf. Bestimmen Sie die Offsetspannung und kompensieren Sie diese.
- Bestimmen Sie die Verstärkung v in Abhängigkeit der Frequenz für verschieden große Gegenkopplungsgrade. Stellen Sie die Abhängigkeit doppelt-logarithmisch dar. Bestimmen Sie mit Hilfe der Grafik das Verstärkungs-Bandbreite-Produkt B des verwendeten OPVs.
- Bauen Sie eine Konstantspannungsquelle mit Spannungsfolger an einer Zenerdiode auf. Vergleichen Sie die Spannungs Konstanz der Konstantspannungsquelle mit Zenerdiode mit der Spannungs Konstanz nach dem Spannungsfolger. Berechnen Sie jeweils den Innenwiderstand der Spannungsquelle.
- Realisieren Sie einen Strom-Spannungswandler mit vorgegebenem Wandlerfaktor.
- Bauen Sie eine Schaltung, die die Funktion $U_A = 10U_{E1} + 2U_{E2}$ realisiert. Überprüfen Sie deren Funktion.
- Bauen Sie einen Differenzverstärker. Überprüfen Sie seine Funktion und messen Sie die Gleichtaktunterdrückung des benutzten OPVs.