Vorlesung: Ladungsempfindlicher Verstärker und Spannungsverstärker mit zwei Stufen

Die Themen dieser Vorlesung sind:

- Ladungsempfindlicher Verstärker
- Spannungsverstärker mit zwei Stufen

Ladungsempfindlicher Verstärker

Ladungsverstärker wird für Verstärkung von Sensorsignalen oft benutzt. Diese Schaltung hat sehr Ähnliche Form wie der Spannungsverstärker aus Vorlesung 6. Wir werden nun die Übertragungsfunktion vom Ladungsverstärker herleiten.

Wir fangen mit dem Spannungsverstärker an:

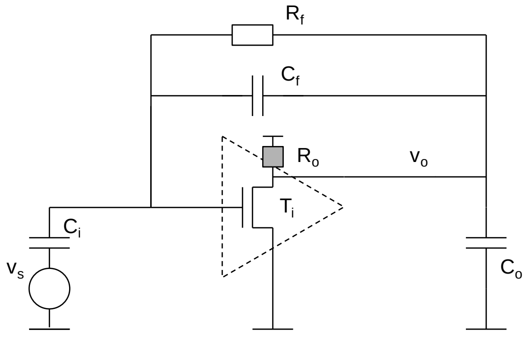


Abbildung 1: Spannungsverstärker

Seine Übertragungsfunktion ist (24):

$$v_o = -v_s \frac{C_i}{C_f} \alpha \frac{sT_f}{(sT_f+1)} \frac{1}{(sT_r+1)} \qquad (1B)$$

mit

$$T_f = R_f C_f, T_r = \frac{sT_0 \alpha}{\beta \times A},\ T_0 = R_o C'_o,\ \beta = \frac{C_f}{C_i^+ + C_f}, \alpha \equiv \frac{\beta \times A}{1+\beta \times A}, C_i^+ = C_i + C_g$$

Wir wandeln zuerst die Spannungsquelle am Eingang in Stromquelle um:

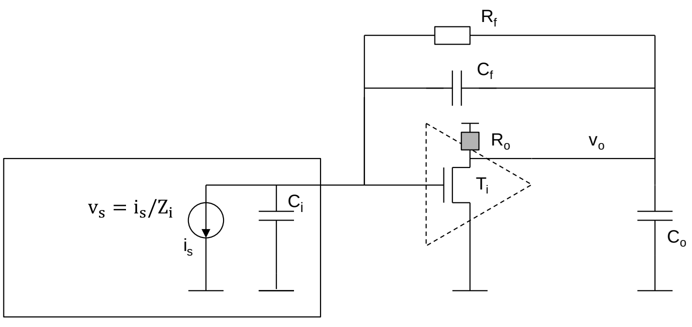


Abbildung 2: Umwandung der Spannungsquelle in Stromquelle

Es gilt

$$v_s = \frac{i_s}{Z_i} \qquad (2B)$$

I_s ist der Strom der Stromquelle. **Die Eingangskapazität C_i ist normalerweise die Kapazität des Sensors.**

Leiten wir jetzt die Strom-Verstärkung her, definiert als v_o / i_s.

Es gilt (1B)

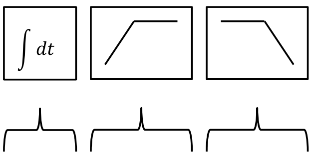
$$v_o = -v_s \frac{C_i}{C_f} \alpha \frac{sT_f}{(sT_f+1)} \frac{1}{(sT_r+1)}$$

Wenn wir (2B) einsetzten, bekommen wir:

$$v_o = -\frac{i_s}{sC_i} \frac{C_i}{C_f} \alpha \frac{sT_f}{(sT_f+1)} \frac{1}{(sT_r+1)} = -\frac{i_s}{sC_f} \alpha \frac{sT_f}{(sT_f+1)} \frac{1}{(sT_r+1)} \qquad (3B)$$

Beachten wir, dass die Verstärkung nicht von der Eingangskapazität C_i abhängig ist, falls $\beta A >> 1$ ist. Das ist oft sehr nützlich da die Sensorkapazität C_i groß und unbekannt ist.

Die Verstärkung v_o/i_s ist die Kombination des Integrators, Hochpass und Tiefpass, Abbildung 3.



$$v_o = -\frac{i_s}{sC_f} \alpha \frac{sT_f}{(sT_f+1)} \frac{1}{(sT_r+1)}$$

Abbildung 3: Übertragungsfunktion des Ladungsverstärkers

Wie sieht die Impulsantwort auf ein Stromimpuls mit dem Integral Q aus?

Das wird mit Abbildung 4 illustriert.

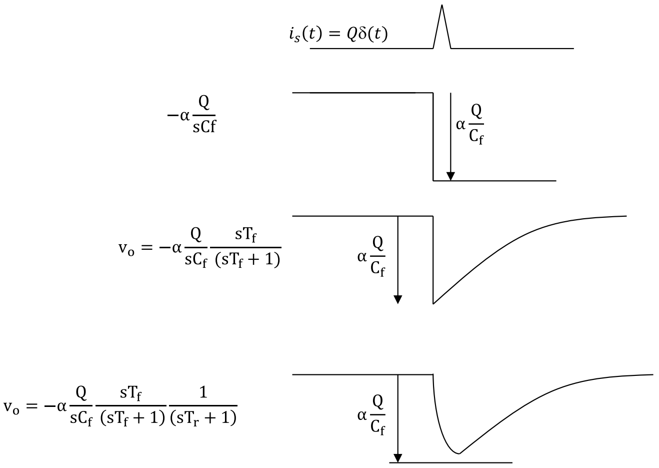


Abbildung 4: Impulsantwort des Ladungsverstärkers auf ein Stromimpuls mit dem Integral Q

Amplitude des Ausgangssignals hängt vom Integral Q dividiert durch C_f ab! Die Ladung wird direkt verstärkt, das Ausgangssignal ist zur Q proportional und unabhängig von der Form des Impulses. Deshalb nennen wir die Schaltung ladungsempfindlicher Verstärker.

Spannungsverstärker mit zwei Stufen

Wie sehen aus der Formeln 1B (Spannungsverstärker) und 3B (Ladungsverstärker), dass die Verstärkung und Anstiegszeit vom Parameter α abhängig sind. α sollte möglichst nah 1 sein.

$\alpha \equiv \frac{\beta \times A}{1+\beta \times A}, \beta = \frac{C_f}{C_i^{+}+C_f}, C_i^{+} = C_i + C_g$ (4B)

Oft ist die Eingangskapazität C_i groß und die Kapazität in Rückkopplung C_f klein. Wir brauchen deswegen große Leerlaufverstärkung A um $\alpha \sim 1$ zu haben. Es ist schwer mit einem Verstärker aus einem Transistor (wie in Abbildung 1) A>100 zu erreichen.

Zweistufiger Verstärker wird benutzt um eine größere Leerlaufverstärkung zu erreichen. Abbildung 5 zeigt einen zweistufigen Spanungsverstärker.

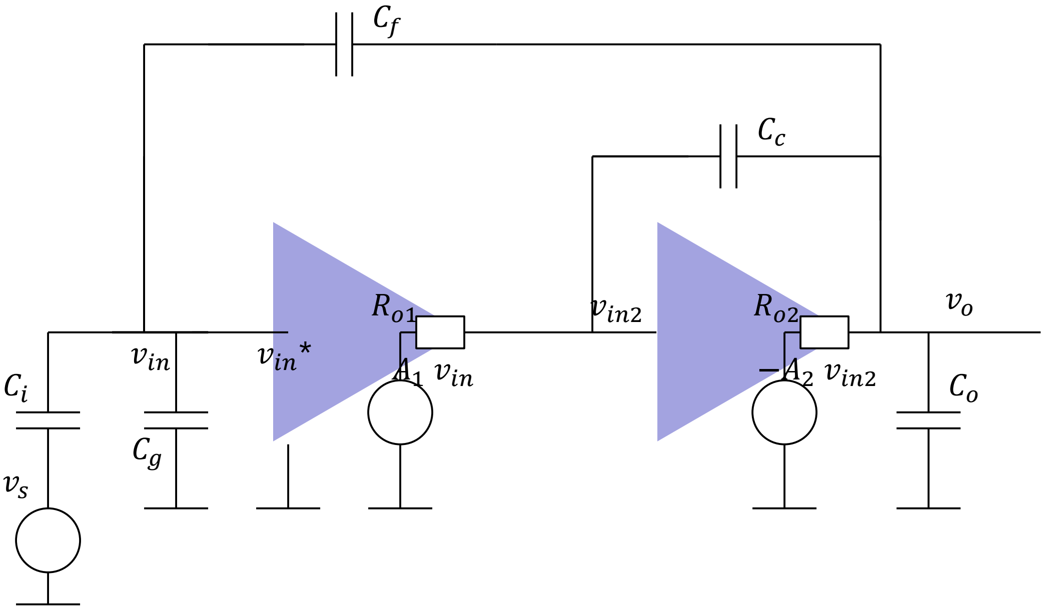


Abbildung 5

Wir werden jetzt die Übertragungsfunktion mithilfe der Mason-Formel (5B) berechnen.

$A_{FB} = \frac{FF+A_{in}A_{ol}}{1-\beta A_{ol}}$ (5B)

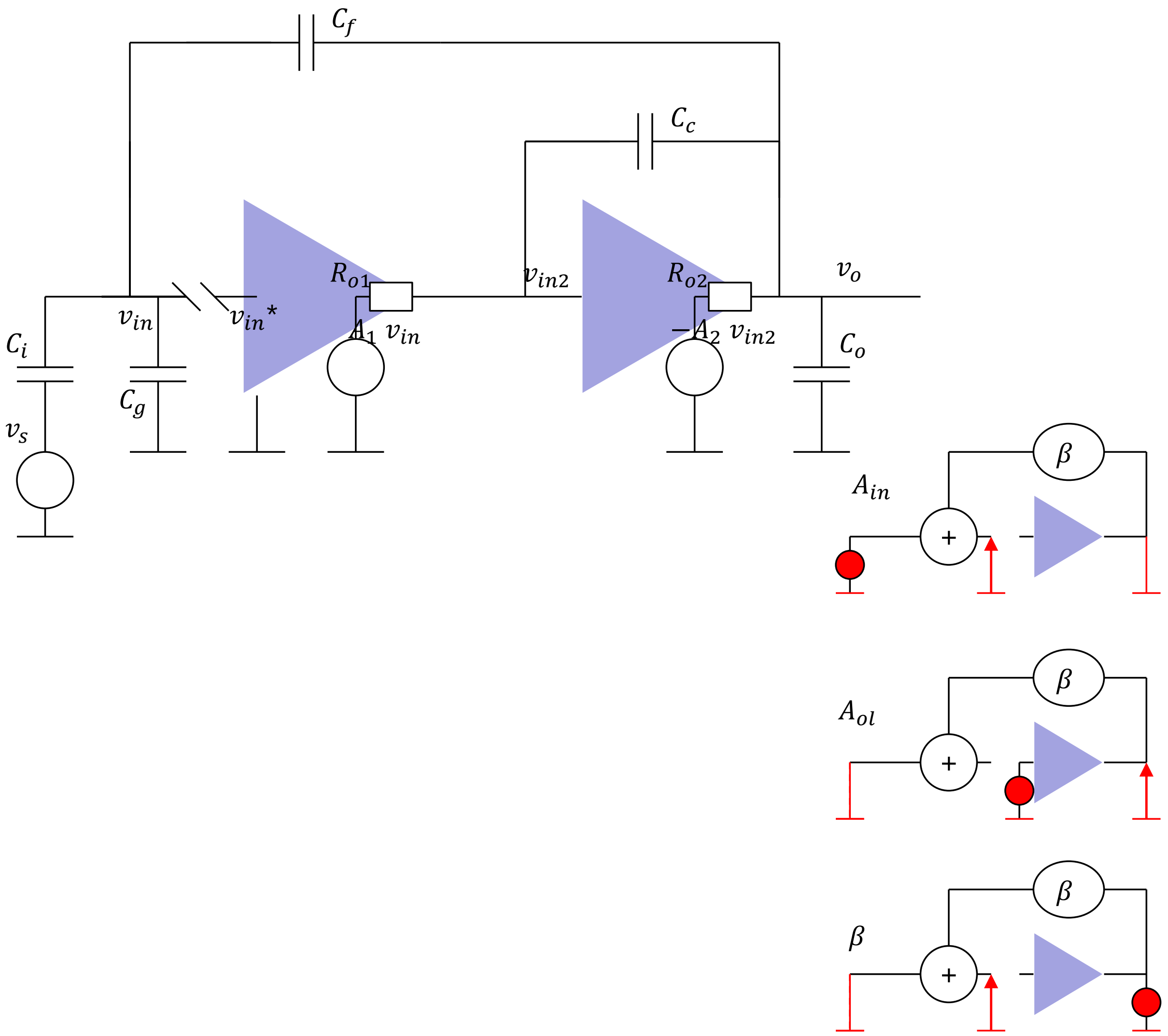


Abbildung 6

Abbildung 6 zeigt die Testschaltungen für die Größen A_{in}, A_{ol} und β. Die FF werden wir vernachlässigen.

Die A_{in} und β (Abbildung 7 und Abbildung 8) sind gleich wie bei einem einstufigen Verstärker.

$A_{in} = \frac{sC_i}{s(C_i^+ + C_f)}$ (6B)

$\beta = \frac{sC_f}{s(C_i^+ + C_f)}$ (7B)

$$A_{in} = \frac{sC_i}{s(C_i^+ + C_f)}$$

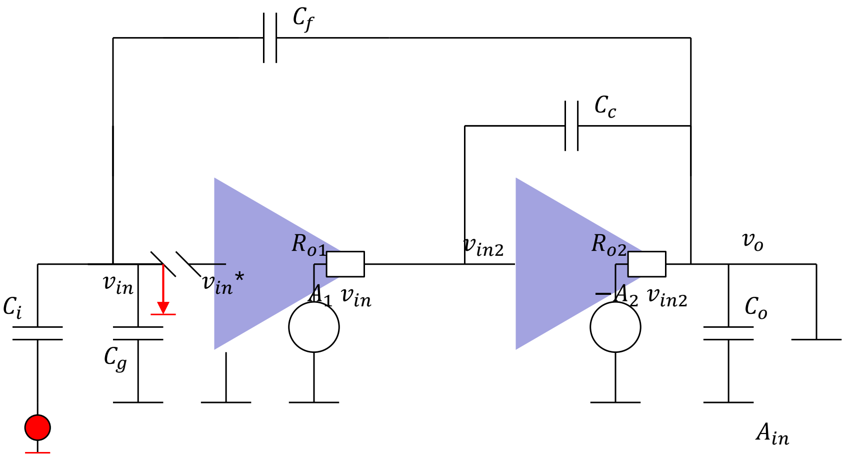


Abbildung 7

$$\beta = \frac{C_f}{C_i^+ + C_f}$$

$$A_{in} = \frac{sC_i}{s(C_i^+ + C_f)}$$

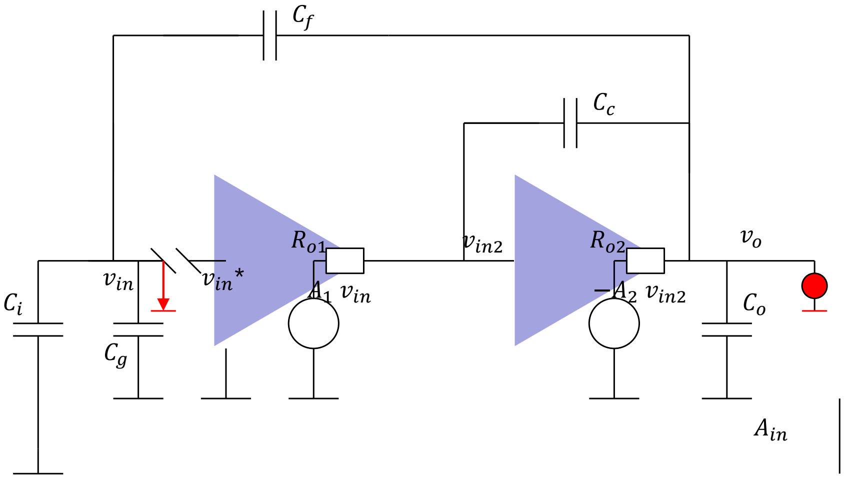


Abbildung 8

Berechnen wir A_{ol}. Die Testschaltung ist in Abbildung 9.

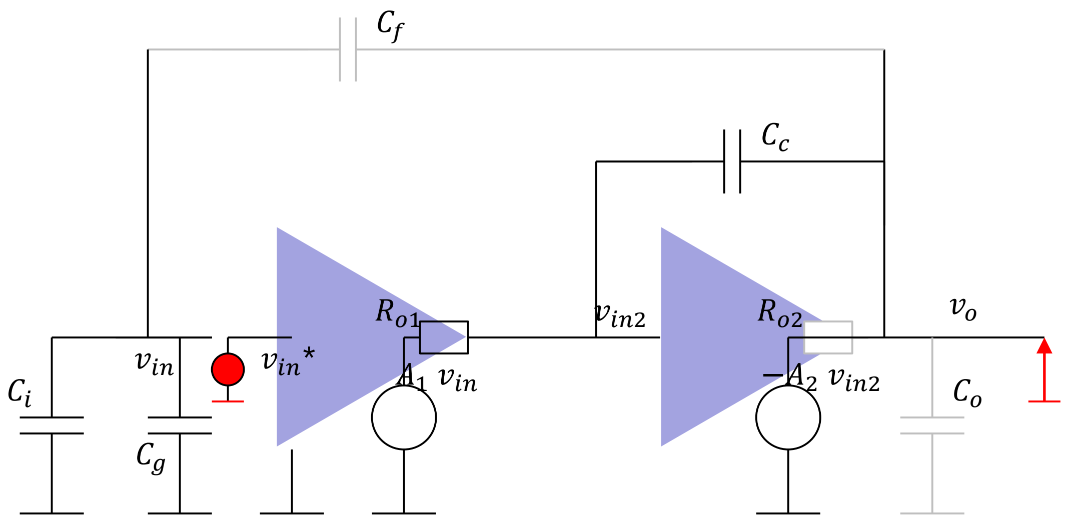


Abbildung 9

Wir werden den Ausgangswiderstand R_{o2} vernachlässigen und $v_o = -A_2 v_{in2}$ annehmen. C_f und C_o können dann ebenfalls vernachlässigt werden.

Der zweite Verstärker stellt eine kapazitive Last für den ersten Verstärker dar. Wie groß ist diese kapazitive Last? Ein Verstärker mit negativer Verstärkung -A und kapazitiver Rückkopplung C hat eine Eingangskapazität von C(1+A). Wir können dieses Ergebnis verifizieren indem wir uns ein C-Meter vorstellen - Abbildung 10.

Ein „C-Meter“ misst die Kapazität indem es einen Strom I_{test} erzeugt und misst wie viel die Spannung am Kondensator (ΔU) angestiegen ist nach der Zeit ΔT Abbildung 10 (links). Die Kapazität kann man mit folgender Formel bestimmen:

$$I_{test} = C\frac{\Delta U}{\Delta T} \Rightarrow C = I_{test}\frac{\Delta T}{\Delta U}$$

Kleinere Spannungsänderung bedeutet größere Kapazität.

Nehmen wir jetzt an, dass genau der gleiche Strom in den Kondensator mit Verstärker fließt - Abbildung 10 (rechts).

Die Spannung zwischen den Kondensator-Elektroden ist nach der Zeit ΔT gleich wie vorher:

$$\Delta U = \frac{I_{test}}{C}\Delta T$$

Die Spannung am Eingang des Verstärkers ändert sich nur um etwa:

$$\Delta U_{in} = \frac{\Delta U}{A+1} \ll \Delta U$$

Die Spannung am Ausgang ändert sich um

$$\Delta U_{out} = -\Delta U\frac{A}{A+1} \sim \Delta U$$

Die Differenz ΔU_{in} - ΔU_{out} ist U.

Da das Messgerät eine um A+1 kleinere Spannungsänderung als ΔU misst, interpretiert es wie eine um Faktor A+1 größere Kapazität als C.

Die kapazitive Last für die erste Stufe ist deswegen $1+A_2C_c$.

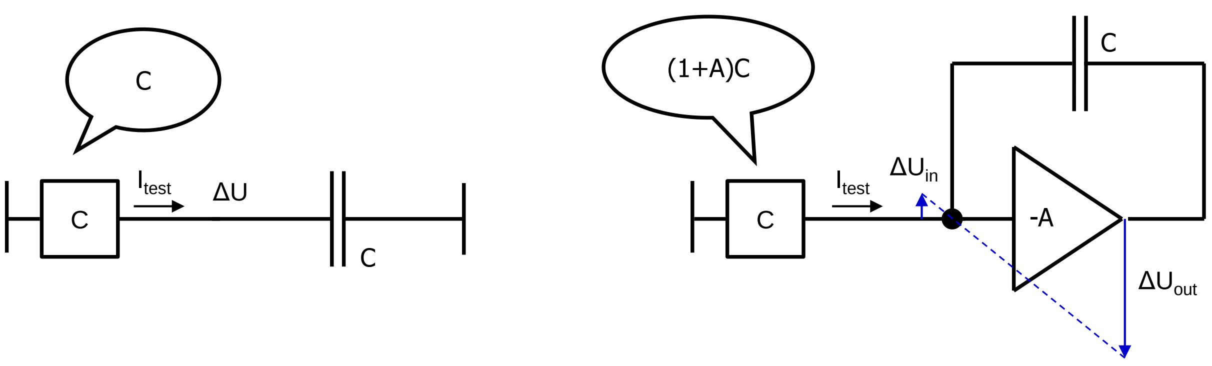


Abbildung 10

Wir können also den zweistufigen Verstärker vereinfachen, indem wir zweiten Verstärker durch eine Lastkapazität $(1+A_2)\,C_c$ und eine spannungsgesteuerte Spannungsquelle ersetzen – Abbildung 11.

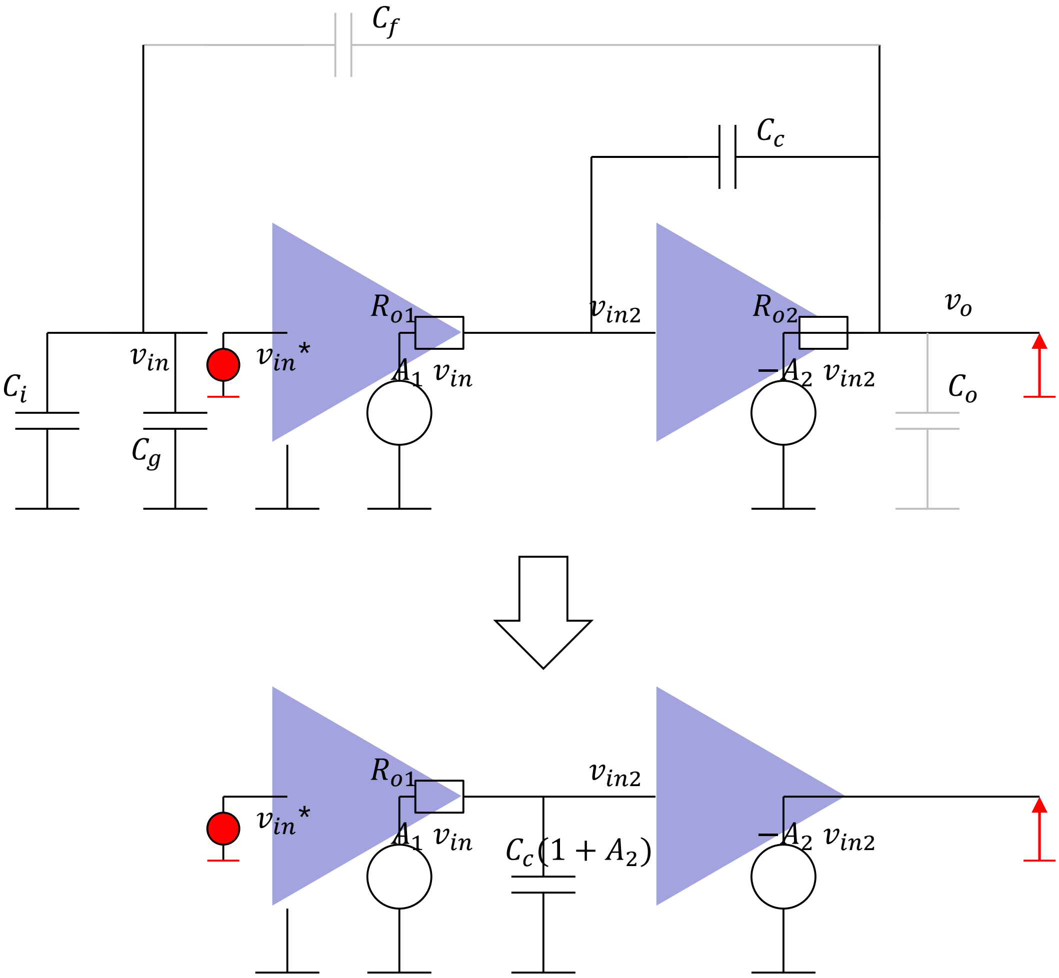


Abbildung 11

Die Leerlaufverstärkung A_{ol} ist:

$$A_{ol} = -A_1 A_2 \frac{1}{sR_{o1}(1+A_2)C_c+1}$$

oder

$$A_{ol} = -A\frac{1}{sT_o+1}\ (8B)$$

mit

$$T_o = R_{o1}(1+A_2)C_c$$

und

$$A = A_1 A_2$$

Durch einsetzten in Mason-Formel bekommen wir die Übertragungsfunktion:

$$A_{fb} = -\frac{C_i}{C_f}\frac{\beta\times A}{(1+\beta\times A)}\frac{1}{\left(\frac{sT_0}{1+\beta\times A}+1\right)} = -\frac{C_i}{C_f}\alpha\frac{1}{\left(\frac{sR_{O1}\,A_2C_c\alpha}{\beta\times A_1A_2}+1\right)} = -\frac{C_i}{C_f}\alpha\frac{1}{\left(\frac{sR_{O1}C_c\alpha}{\beta\times A_1}+1\right)} \quad (9B)$$

Im Fall von Verstärkern die auf Transistoren basieren gilt $A = g_m R_o$. Deswegen:

$$A_{fb} = -\frac{C_i}{C_f}\alpha\frac{1}{\left(\frac{sC_c\alpha}{\beta\times g_{m1}}+1\right)}, \alpha\equiv\frac{\beta\times A}{1+\beta\times A},\ A = g_{m1}R_{o1}g_{m2}R_{o2} \quad (10B)$$

Zum Vergleich: Im Fall vom einstufigen Verstärker hatten wir:

$$A_{fb} = -\frac{C_i}{C_f}\alpha\frac{v_s}{\left(\frac{sC'_o\alpha}{\beta g_m}+1\right)}, \alpha\equiv\frac{\beta\times A}{1+\beta\times A},\ A = g_mR_o \quad (11B)$$

Die Formeln 10B und 11B sind fast identisch. Beim zweistufigen Verstärker hängt die Zeitkonstante von C_c und beim einstufigen Verstärker von Co ab. Große Leerlaufverstärkung kann mit dem zweistufigen Verstärker leicht erreicht werden.