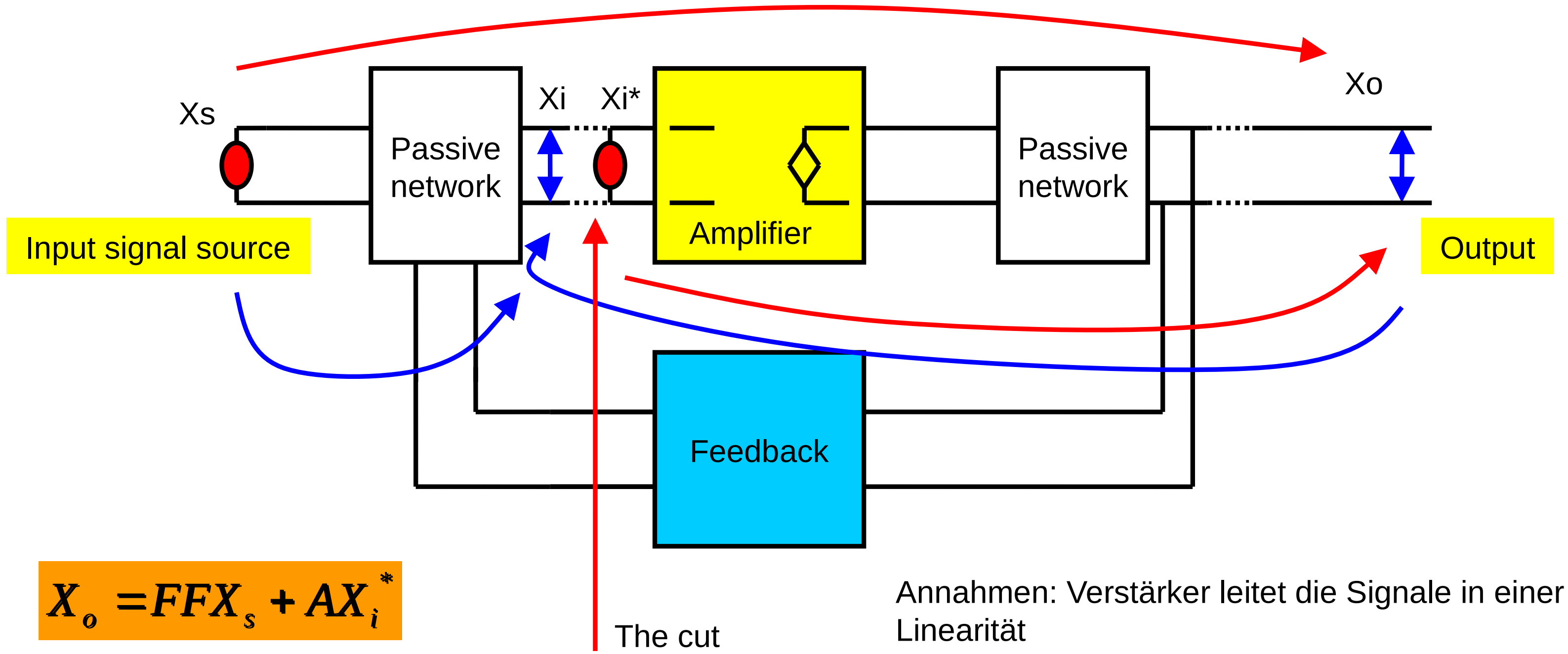
Formeln für die Schaltungen mit Gegenkopplung



$$X_o = FF X_s + A X_i^*$$

$$X_i = A_{IN} X_s + \beta X_o$$

$$X_i = X_i^*$$

Leerlaufverstärkung

$$A_F = \frac{X_o}{X_s} = \frac{FF + A_{IN} A}{1 - \beta A}$$

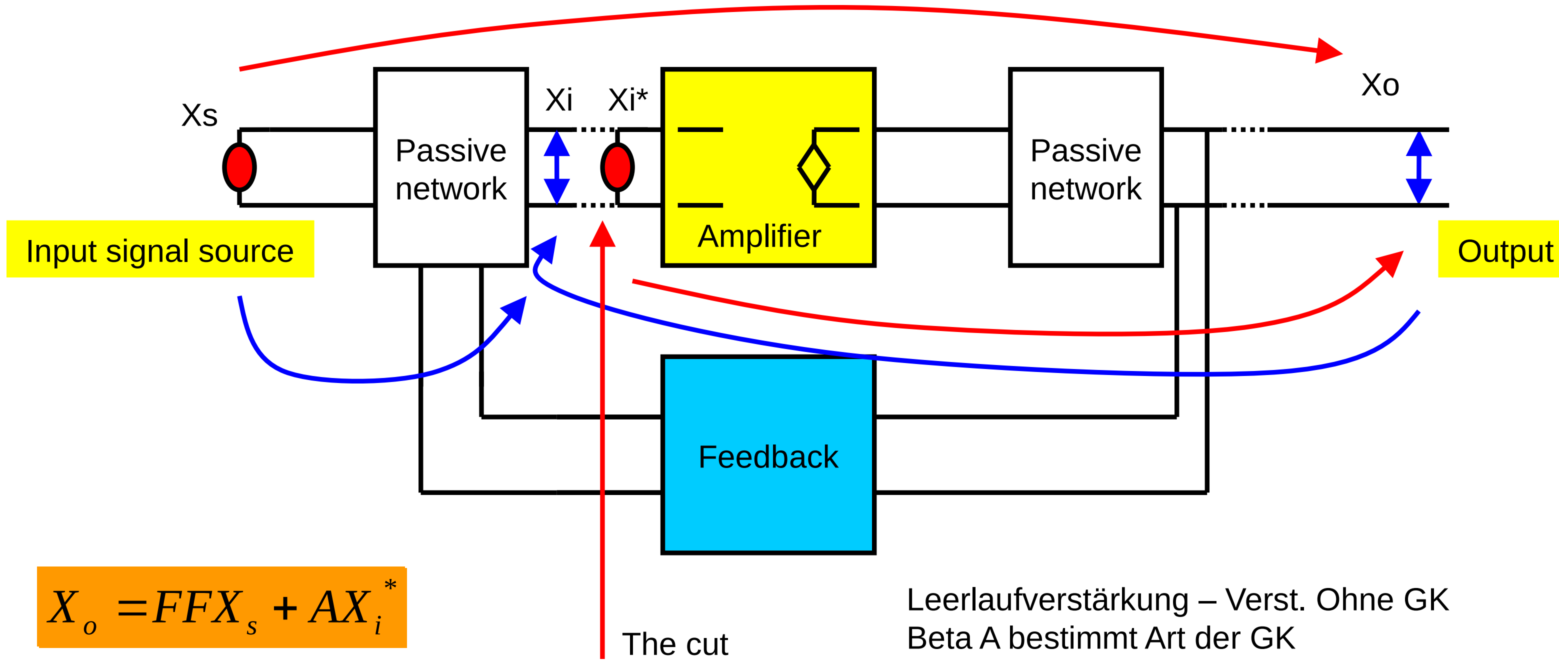
Schleifenverstärkung

Feedforward

Annahmen: Verstärker leitet die Signale in einer Richtung
Linearität
Passive Schaltungen mit R C L
Gleichungssystem
Gleichungssystem wird einmal für die generische Schaltung gelöst
Die Terme der Formel können später für Spezialfälle hergeleitet werden

1. Schritt: GK wird am Eingang des Verstärkers getrennt
2. Eine virtuelle Spannungsquelle xi* wird eingesetzt

Wichtig – Strom durch xi* muss null sein, Zin bleibt links
Zwei Gleichungen werden gescrieben
Erste Gl. xo = f(xs, xi*)
Zweite Gl. xi = f(xs, xo) (weil xi = f(xo), sonst xi = f(xi*))
FF ist … xo/xs|xi*=0



$$X_o = FF X_s + A X_i^*$$

$$X_i = A_{IN} X_s + \beta X_o$$

Leerlaufverstärkung – Verst. Ohne GK
Beta A bestimmt Art der GK
Vereinfachung: FF = 0
Beta A = R >> 0
AF = -1/Beta

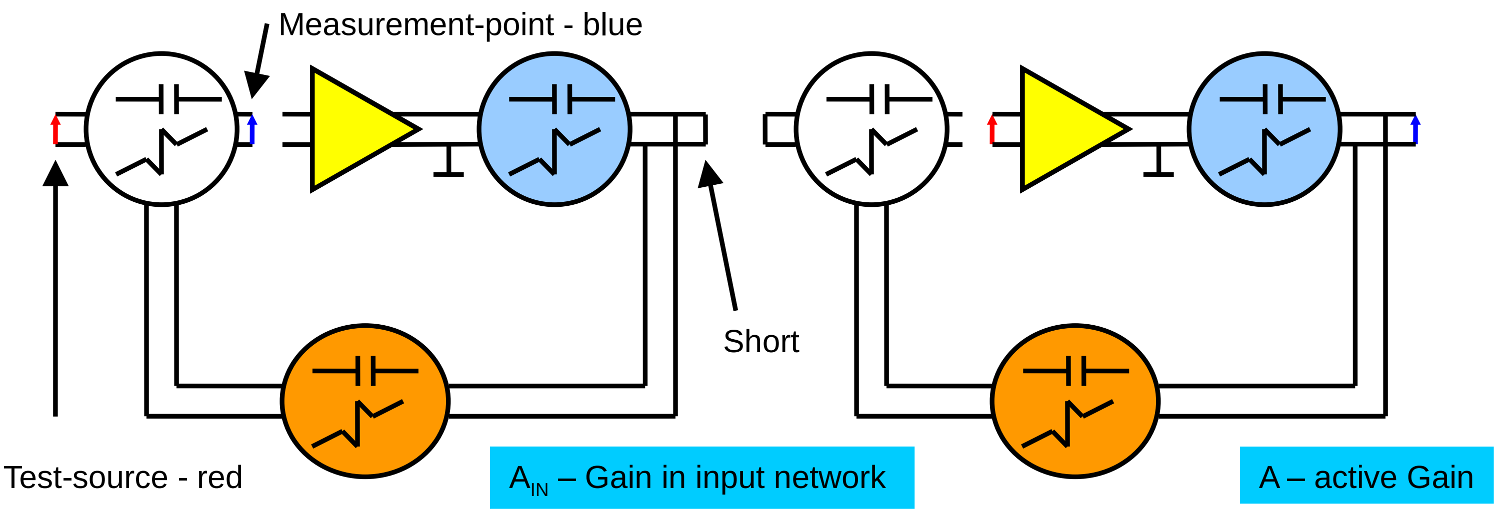
$$X_i = X_i^*$$

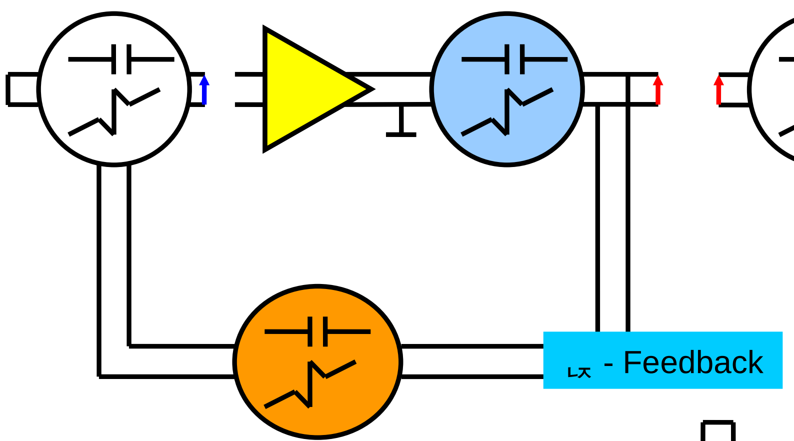
Leerlaufverstärkung

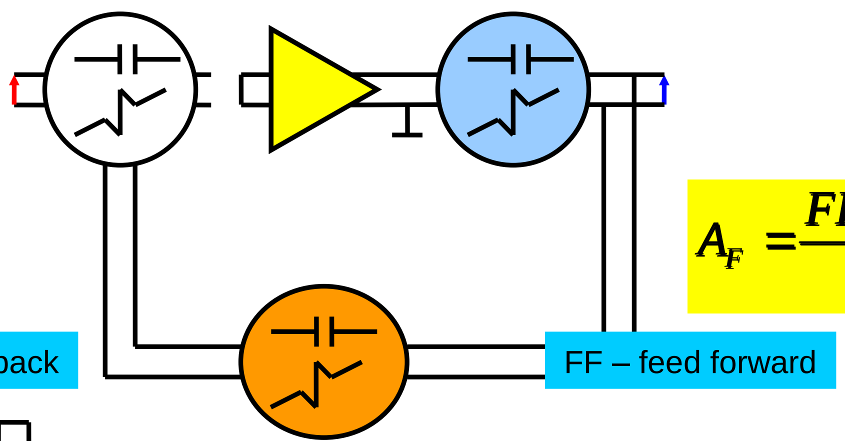
$$A_F = \frac{X_o}{X_s} = \frac{FF + A_{IN} A}{1 - \beta A}$$

Schleifenverstärkung

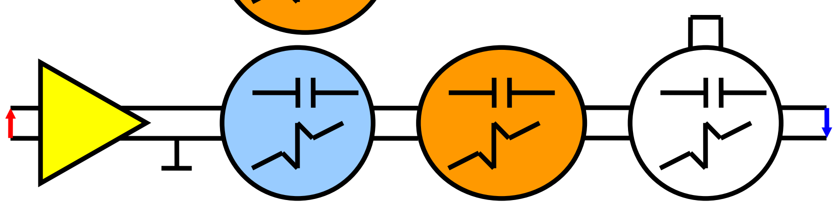
Feedforward





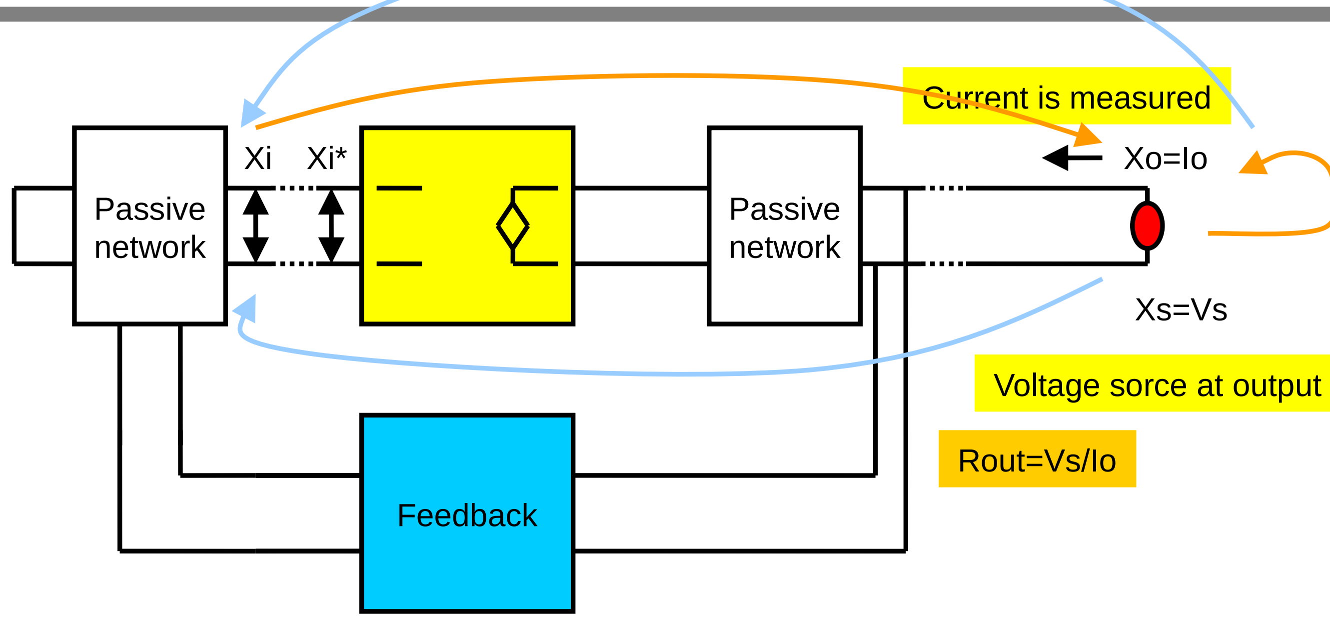


$$A_F = \frac{FF + A_{IN} A}{1 - \beta A}$$



$$A_F = \frac{FF + A_{IN} A}{1 + T}$$

Output impedance



Zwei Möglichkeiten um Rout zu rechnen
Vs Quelle am Ausgang, Io wird gerechnet
Erste Formel wird hergeleitet

$$I_o = t_{11} V_s + t_{12} X_i^*$$

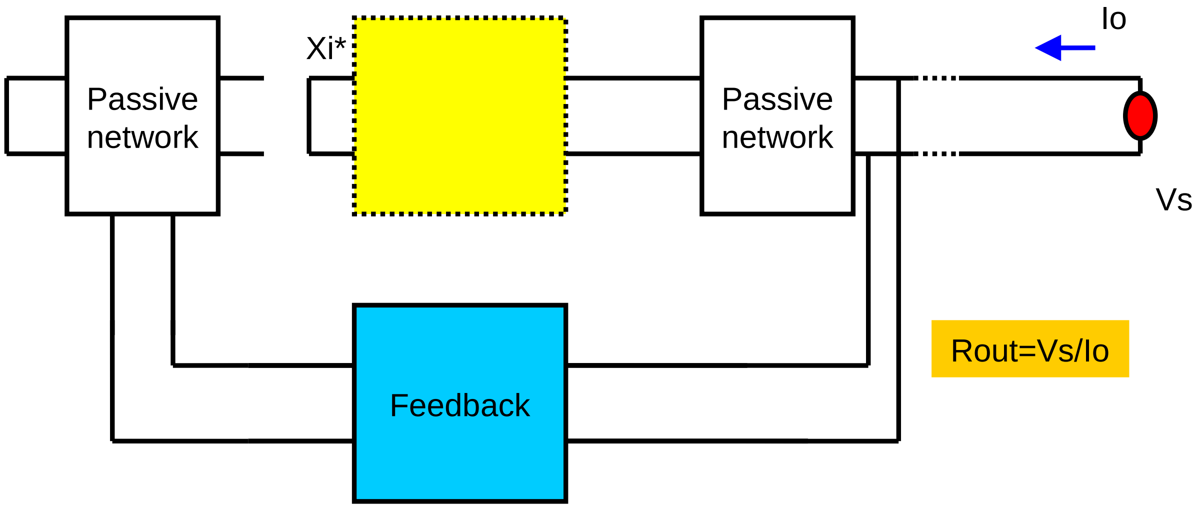
$$X_i = t_{21} V_s + t_{22} I_o$$

$$X_i = X_i^*$$

$$\frac{1}{R_{FB}} = \frac{I_o}{V_s} = \frac{t_{11} + t_{12} t_{21}}{1 - t_{12} t_{22}}$$

$$R_{FB} = \frac{1}{t_{11}} \frac{1 - t_{12} t_{22}}{1 + t_{12} t_{21} / t_{11}}$$

Output impedance (t_{11})



Rout=Vs/Io

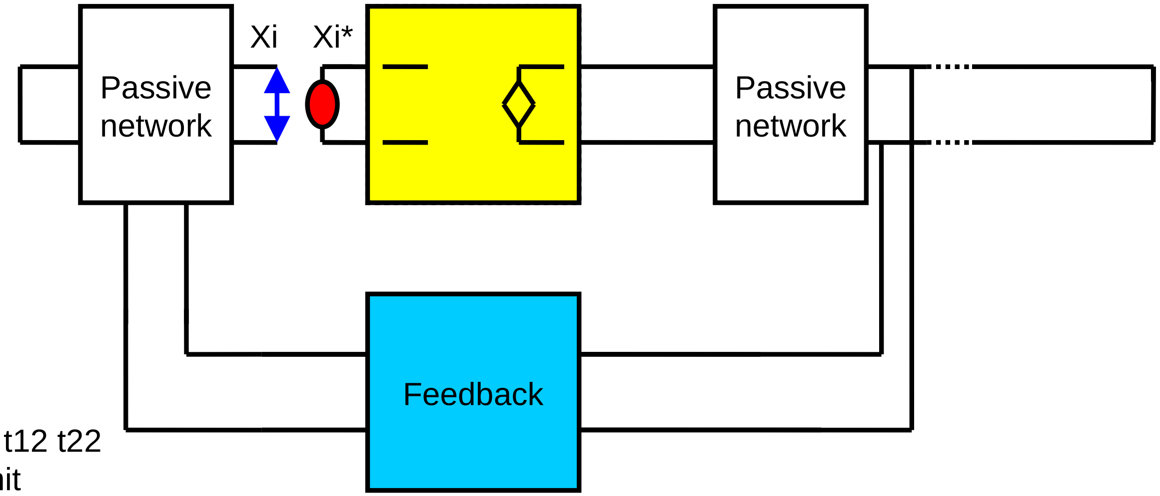
$$I_o = t_{11} V_s + t_{12} X_i^*$$

Bedeutung vom Faktor 1/t11
Strom Io wenn xi* aus ist
Widerstand vom ausgeschaltetem Verstärker

$$R_{FB} = \frac{1}{t_{11}} \frac{1 - t_{12} t_{22}}{1 + t_{12} t_{21} / t_{11}}$$

Dead gain impedance

$$\frac{1}{t_{11}} = \left.\frac{V_s}{I_0}\right|_{X_i^* = 0} \equiv R_0$$



Bedeutung vom Faktor t12 t22
Schleifenverstärkung mit
Kurzschluss am Ausgang

$$t_{12}t_{22} = \left.\frac{I_o}{X_i^*}\right|_{V_s=0} \left.\frac{X_i}{I_o}\right|_{V_s=0}$$

$$R_{FB} = R_0 \frac{1 - t_{12}t_{22}}{1 + t_{12}t_{21}/t_{11}}$$

Short circuit loop gain

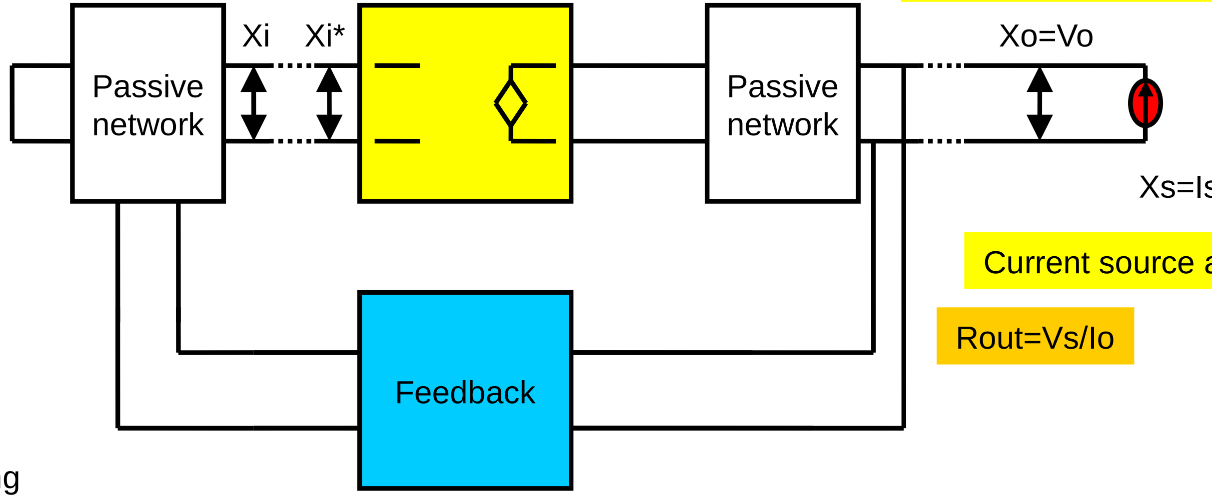
$$I_o = t_{11}V_s + t_{12}X_i^*$$

$$X_i = t_{21}V_s + t_{22}I_o$$

$$R_{FB} = R_0 \frac{1 - T_{SC}}{1 + t_{12}t_{21}/t_{11}}$$

$$T_{SC} = t_{12}t_{22}$$

Voltage is measured



Current source at output

Rout=Vs/Io

Alternative Schaltung
Stromquelle am Ausgang
Strom wird gemessen

$$V_o = t'_{11} I_s + t'_{12} X_i^*$$

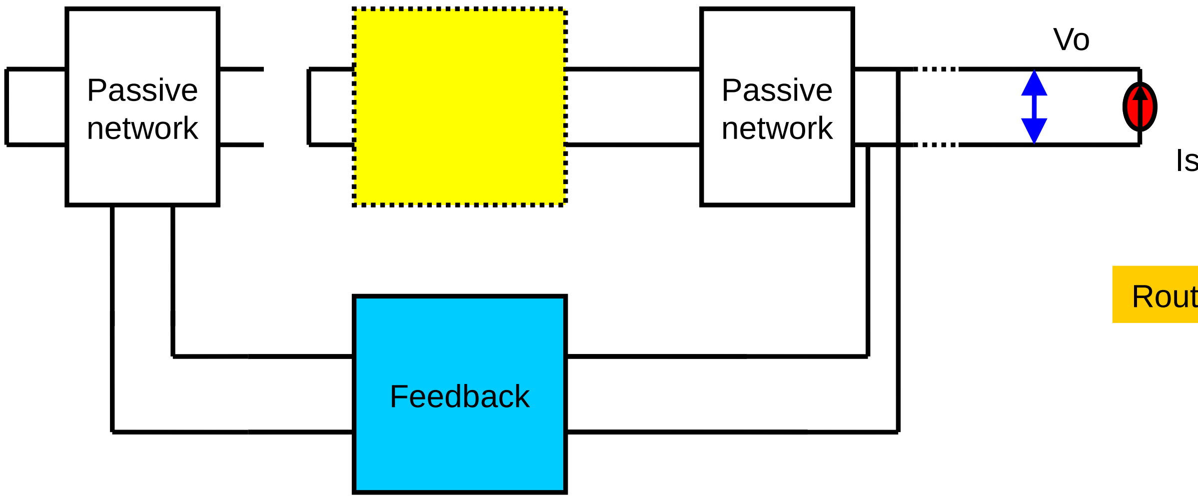
$$X_i = t'_{21} I_s + t'_{22} V_o$$

$$X_i = X_i^*$$

$$R_{FB} = \frac{I_s}{V_o} = \frac{t'_{11} + t'_{12} t'_{21}}{1 - t'_{12} t'_{22}}$$

$$R_{FB} = t'_{11} \frac{1 + t'_{12} t'_{21} / t'_{11}}{1 - t'_{12} t'_{22}}$$

Output impedance (t'_{11})



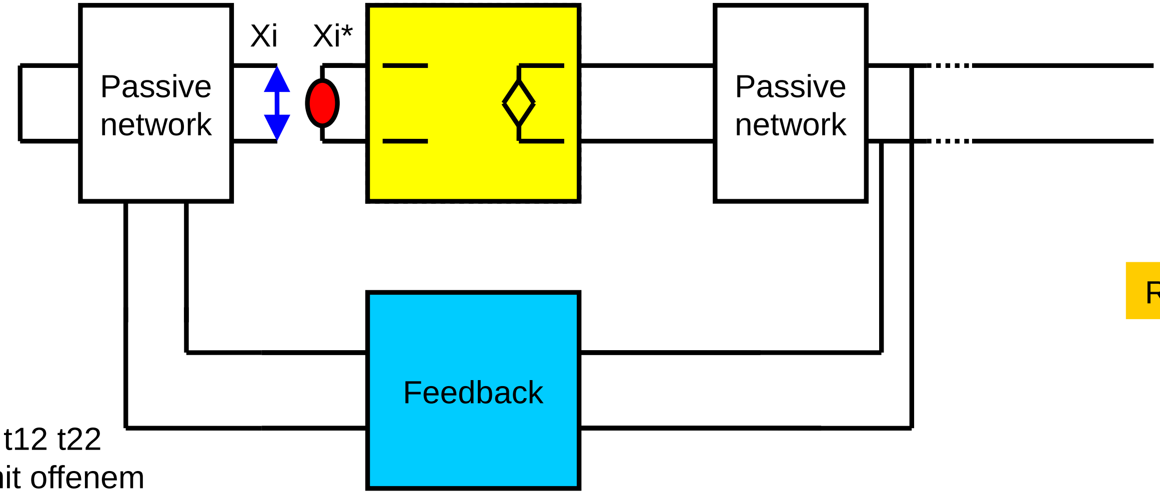
Rout=Vs/Io

Bedeutung vom Faktor t11‘
Strom Io wenn xi* aus ist
Widerstand vom ausgeschaltetem
Verstärker

$$t'_{11} = \left.\frac{V_o}{I_s}\right|_{X_i^* = 0} \equiv R_0$$

$$R_{FB} = t'_{11} \frac{1 + t'_{12} t'_{21} / t'_{11}}{1 - t'_{12} t'_{22}}$$

Dead gain impedance



Rout=Vs/Io

Bedeutung vom Faktor t12 t22
Schleifenverstärkung mit offenem Ausgang

$$R_{FB} = t'_{11} \frac{1 + t'_{12} t'_{21} / t'_{11}}{1 - t'_{12} t'_{22}}$$

$$t'_{12} t'_{22} = \left.\frac{V_o}{X_i^*}\right|_{I_s=0} \left.\frac{X_i}{V_o}\right|_{I_s=0}$$

Open circuit loop gain

$$V_o = t'_{11} I_s + t'_{12} X_i^*$$

$$X_i = t'_{21} I_s + t'_{22} V_o$$

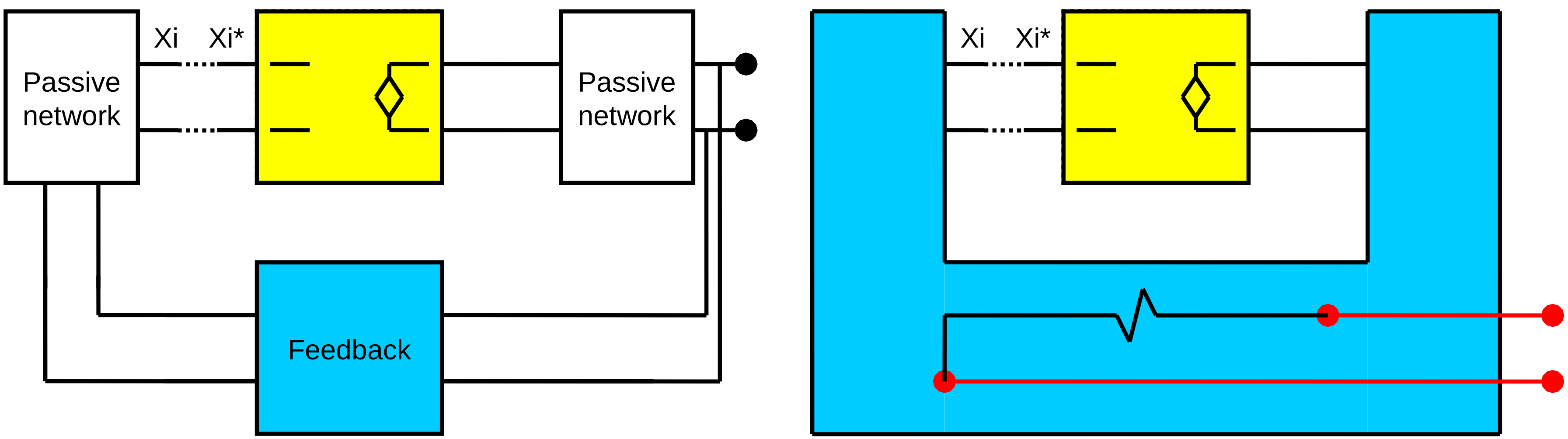
$$R_{FB} = R_0 \frac{1 + t'_{12} t'_{21} / t'_{11}}{1 - T_{OC}}$$

$$T_{OC} = t'_{12} t'_{22}$$

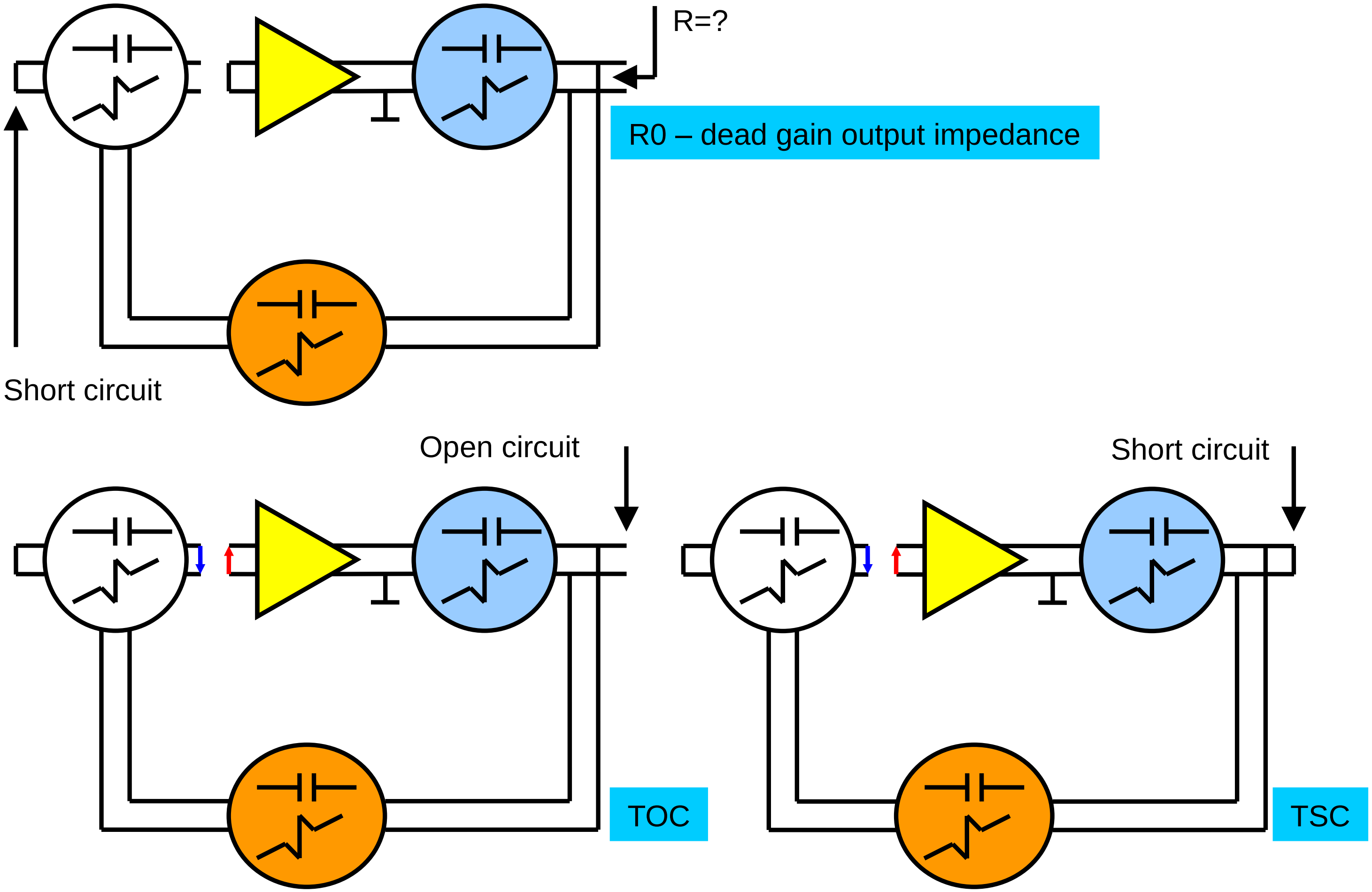
Output impedance – equation

$$R_{FB} = R_0 \frac{1 + t'_{12} t'_{21} / t'_{11}}{1 - T_{OC}} \longrightarrow R_{FB} = R_0 \frac{1 - T_{SC}}{1 - T_{OC}}$$

$$R_{FB} = R_0 \frac{1 - T_{SC}}{1 + t_{12} t_{21} / t_{11}}$$



Zwei Formeln werden kombiniert



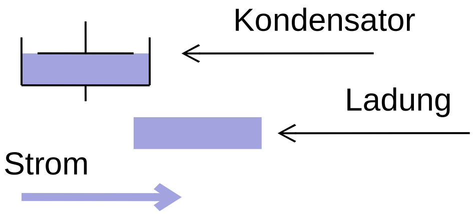
Loop gains

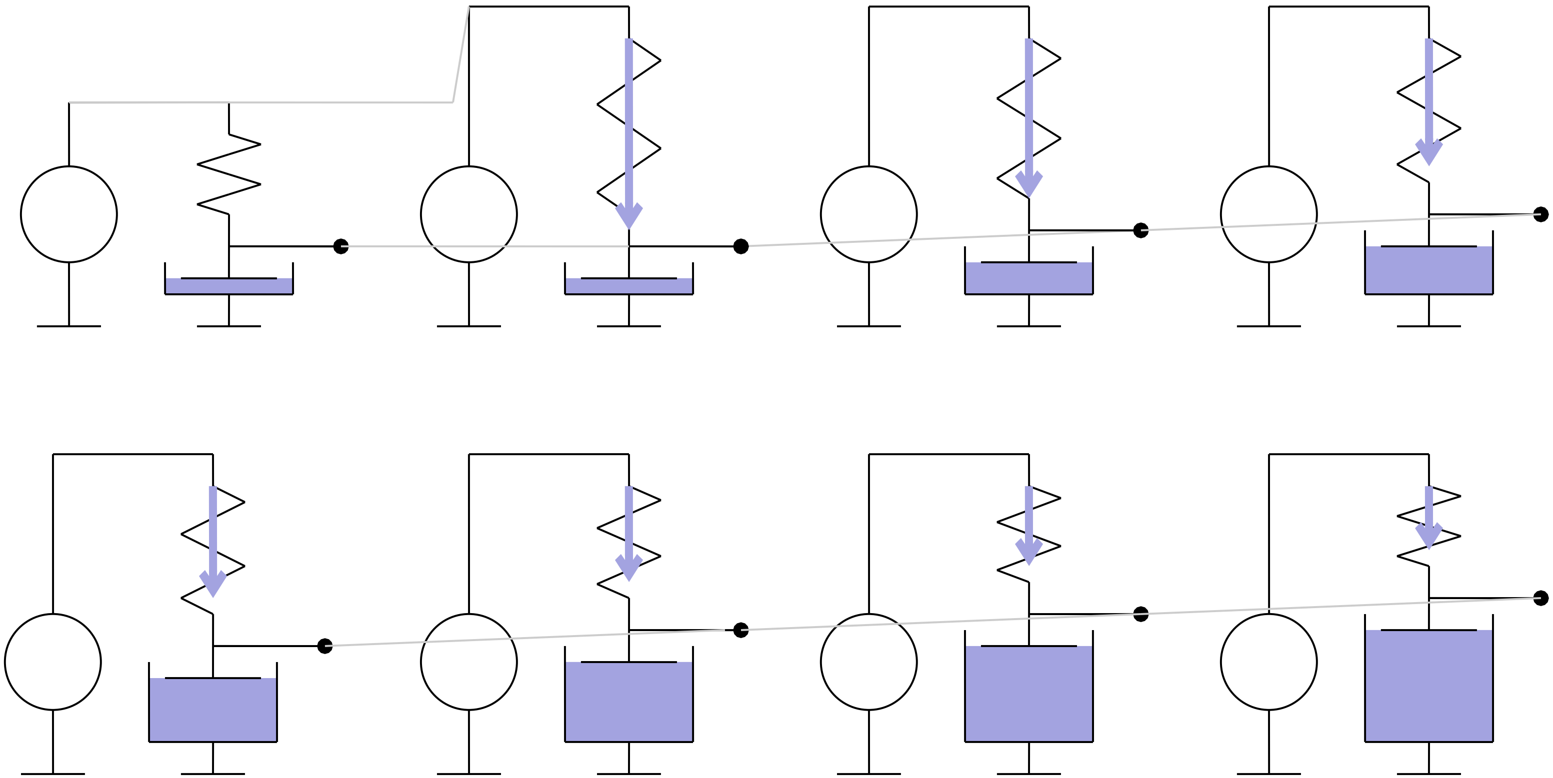
$$R_{OUT} = R_0 \frac{1 - T_{SC}}{1 - T_{OC}}$$

AC Schaltungen

Tiefpass

- Tiefpass
- Ein Kondensator kann nicht unendlich schnell aufgefüllt oder geleert werden
- Kondensator behält die Spannung eine gewisse zeit





Tiefpass

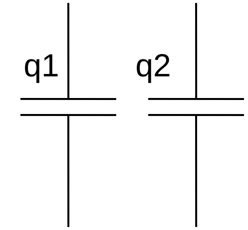
- Tiefpass
- Die Übertragungsfunktion ist Quotient zwei komplexer Polynome
- Wenn wir in der Schaltung n unabhängige Kondensatoren haben (ihre Spannungen sind linearunabhängig) haben wir im Nenner Polynom n-ter Ordnung.
- Die dominante Zeitkonstante ist die Summe von CiRi Faktoren. Ci ist jede Kapazität in der Schaltung, Ri ist der Widerstand den die Kapazität Ci sieht.
- Grad des Polynoms in Zähler ist kleiner oder gleich wie der Grad des Polynoms im Nenner.
- Koeffizienten vom Polynom im Zähler bekommt man aus den Anfangsbedingungen. Wir fragen uns, welche Spannung haben wir kurz nach dem Einschalten (t=0+), welche lange nach dem Einschalten (t=unendlich).

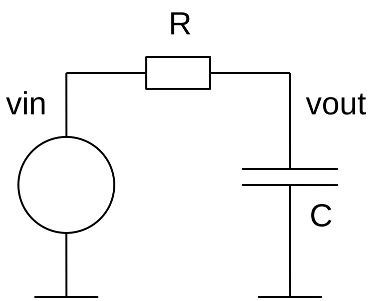
- Tiefpass
- Kurz nach dem Einschalten sind die Frequenzen hoch (die Zeit ist kurz) deshalb haben wir s -> unendlich.

$$v_{out}(s) = v_{in}(s)\frac{b_0 + b_1 s}{1 + sRC}$$

P

Q





$$v_{out}(t) = c_1 + c_2 e^{-t/RC}$$

S=0

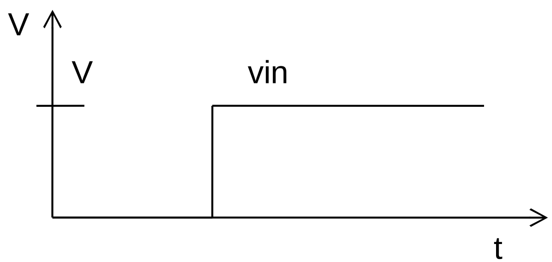
$$\boldsymbol{v_{out}(\infty) = v_{in}(\infty) = V \Rightarrow c_1 = V} \longrightarrow b_0 = 1$$

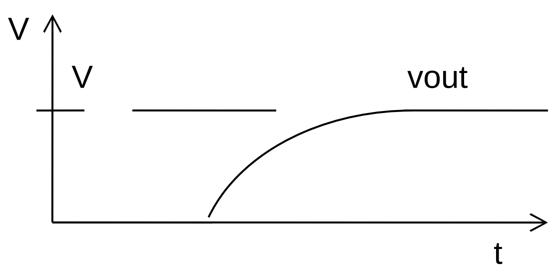
S=unendlich

$$\boldsymbol{v_{out}(0+) = 0 \Rightarrow c_2 = -c_1} \longrightarrow b_1 / RC = 0 \Rightarrow b_1 = 0$$

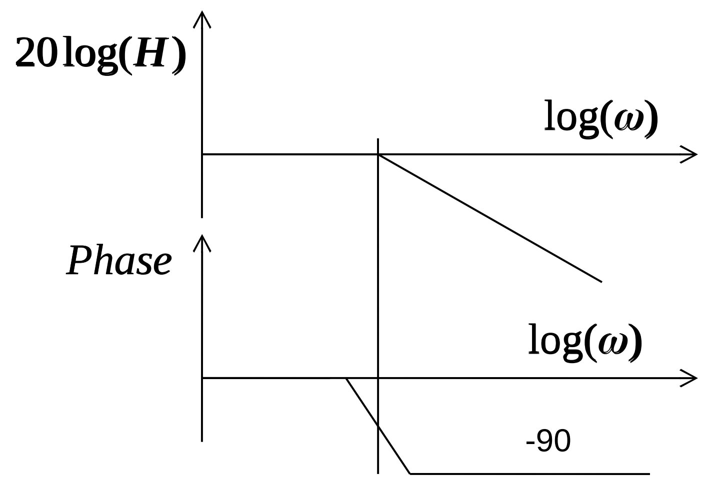
$$\downarrow$$

$$H(s) = \frac{1}{1 + sRC}$$

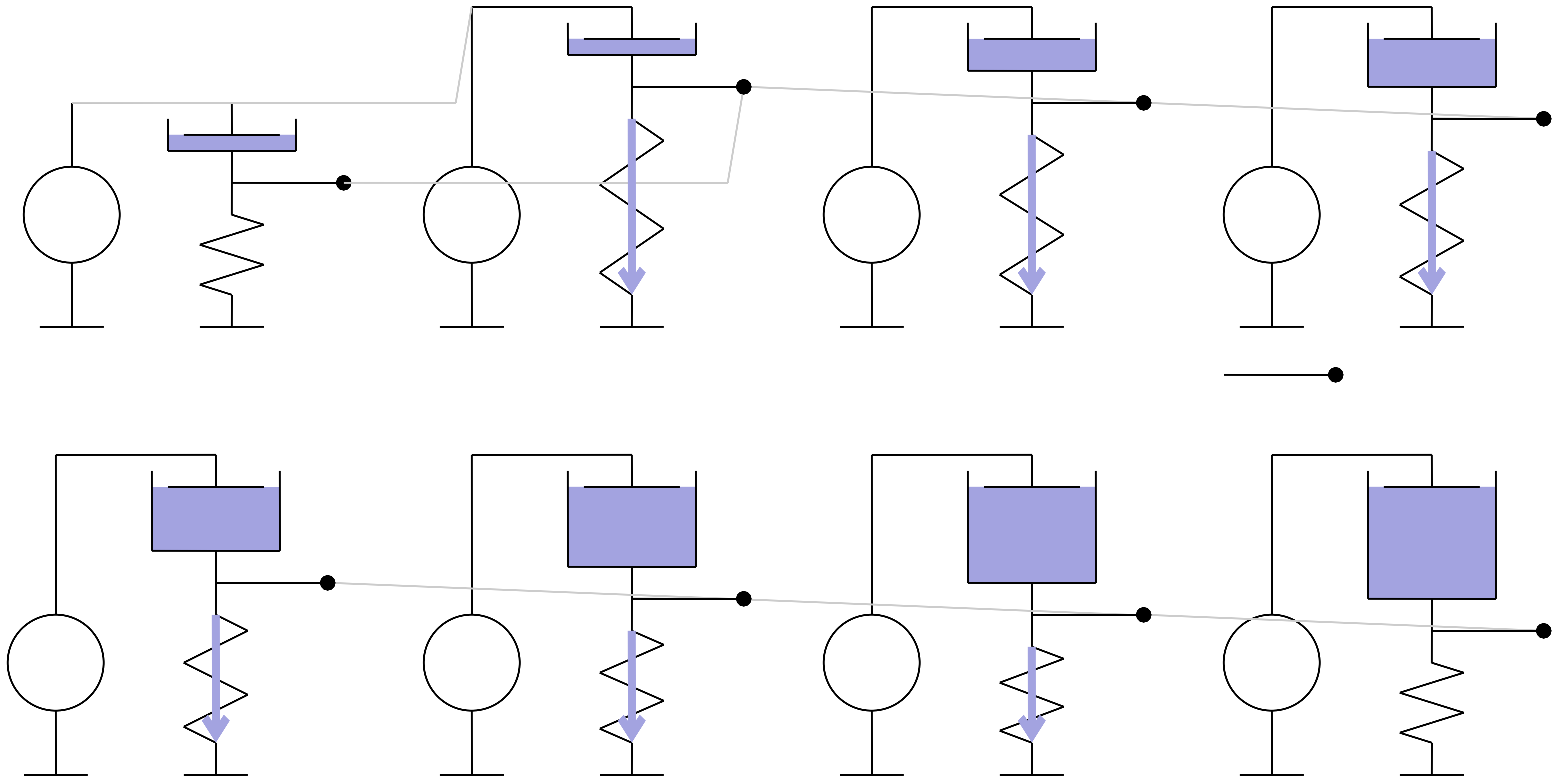




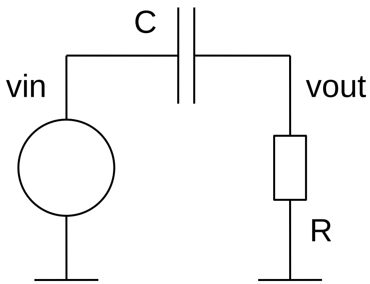
$$v_{out}(t) = V(1 - e^{-t/RC})$$

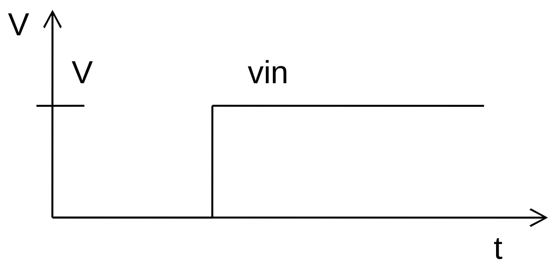


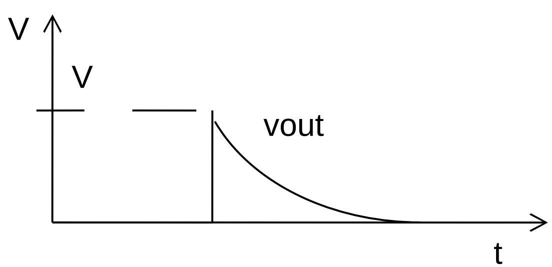
- Hochpass



- Hochpass







$$v_{out}(t) = Ve^{-t/RC}$$

$$v_{out}(s) = v_{in}(s)\frac{b_0 + b_1 s}{1 + sRC}$$

$$v_{out}(t) = c_1 + c_2 e^{-t/RC}$$

S=0

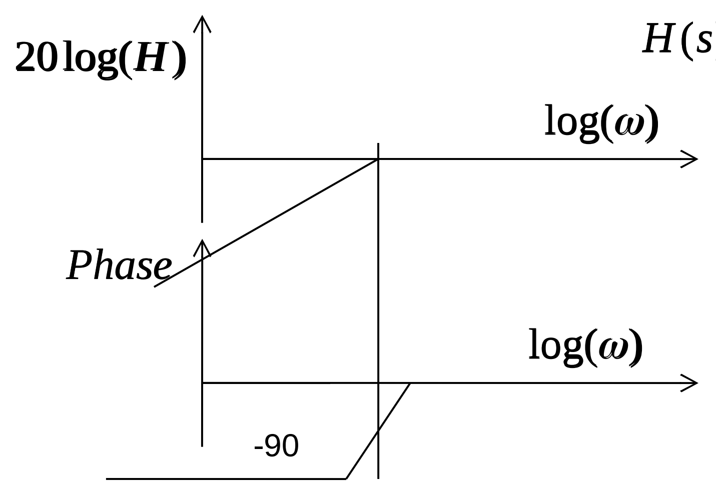
$$v_{out}(\infty) = 0 \Rightarrow c_1 = 0 \longrightarrow b_0 = 0$$

S=unendlich

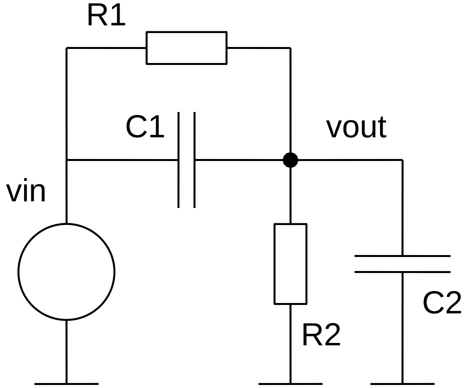
$$v_{out}(0+) = V = v_{in}(0+) \Rightarrow c_1 + c_2 = V \Rightarrow c_2 = V \longrightarrow b_1 = RC$$

$$\downarrow$$

$$H(s) = \frac{sRC}{1 + sRC}$$



- Schneller Spannungsteiler



$$v_{out}(s) = v_{in}(s)\frac{b_0 + b_1 s}{1 + s((R_1 \parallel R_2)(C_1 \parallel C_2))}$$

$$v_{out}(t) = c_1 + c_2 e^{-t/(R_1 \parallel R_2)(C_1 \parallel C_2)}$$

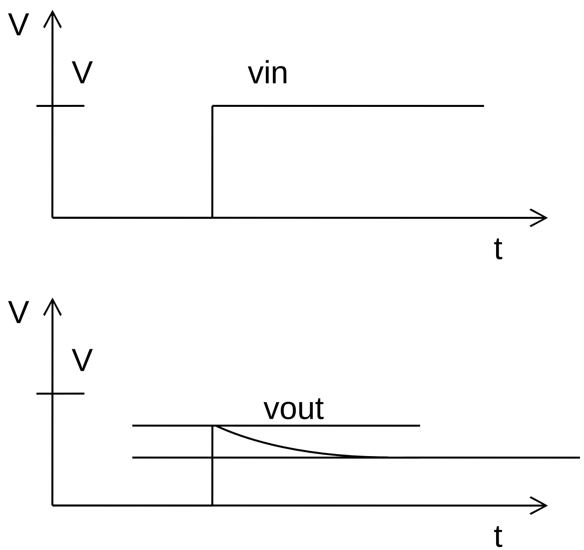
S=0

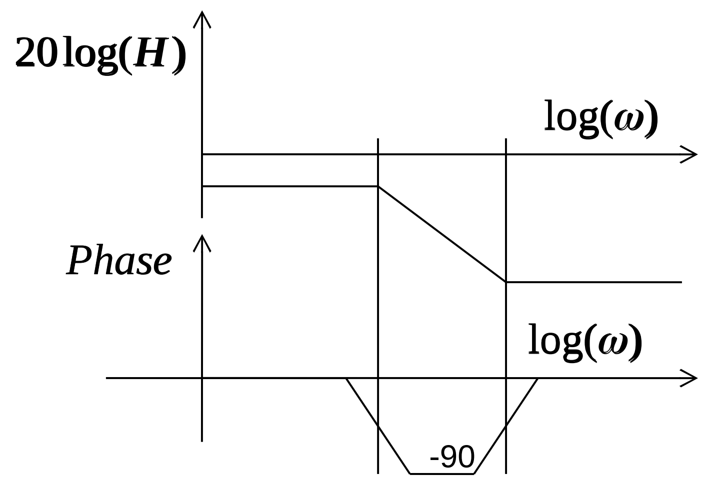
$$v_{out}(\infty) = \frac{R_2}{R_1 + R_2}V \Rightarrow c_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2}V \longrightarrow b_0 = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

S=unendlich

$$v_{out}(0+) = \frac{C_1}{C_1 + C_2}V \Rightarrow c_1 + c_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2}V \longrightarrow b_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2}R_1 C_1$$

$$H(s) = \frac{R_2}{R_1 + R_2}\frac{1 + sR_1 C_1}{1 + s(R_1 \parallel R_2)(C_1 + C_2)}$$



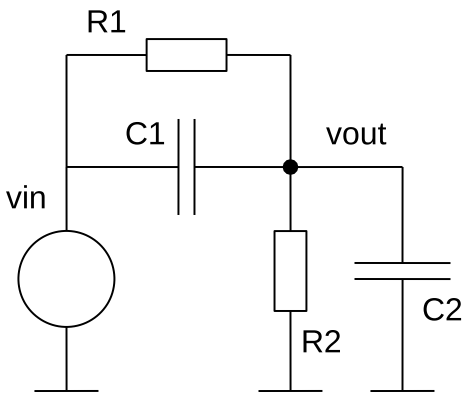


$$v_{out}(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} + \left(\frac{C_1}{C_1 + C_2} - \frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)e^{-t/R_{eq}C_{eq}}$$

Schneller Spannungsteiler

- Schneller Spannungsteiler
- Wir haben zwar zwei Kondensatoren, nur 1 davon ist unabhängig.
- Das Polynom im Nenner beschreibt die Schaltung wenn sie selbst überlassen wird (Eigenverhalten). Schalten wir vin aus – vin = 0, um das Eigenverhalten zu analysieren. Wir können die Kondensatoren und die Widerstände zusammenführen

- Schneller Spannungsteiler



$$v_{out}(s) = v_{in}(s)\frac{b_0 + b_1 s}{1 + s((R_1 \parallel R_2)(C_1 \parallel C_2))}$$

$$v_{out}(t) = c_1 + c_2 e^{-t/(R_1 \parallel R_2)(C_1 \parallel C_2)}$$

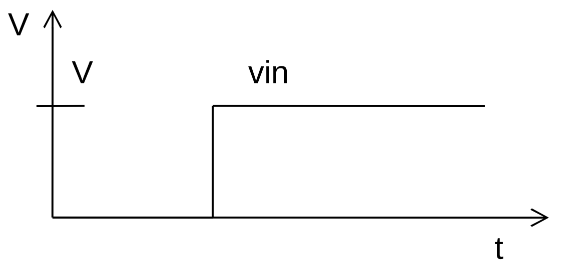
S=0

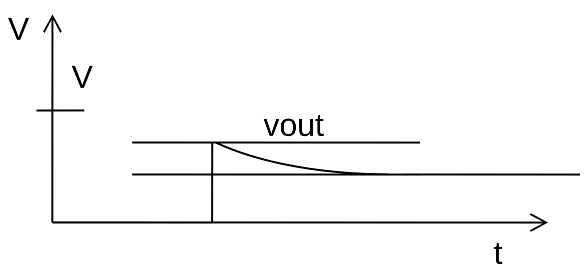
$$v_{out}(\infty) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V \Rightarrow c_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V \longrightarrow b_0 = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

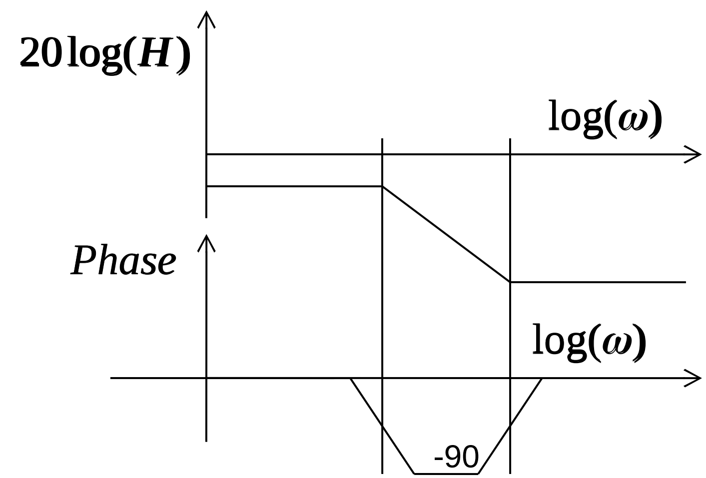
S=unendlich

$$v_{out}(0+) = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V \Rightarrow c_1 + c_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V \longrightarrow b_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} R_1 C_1$$

$$H(s) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \frac{1 + sR_1C_1}{1 + s(R_1 \parallel R_2)(C_1 + C_2)}$$



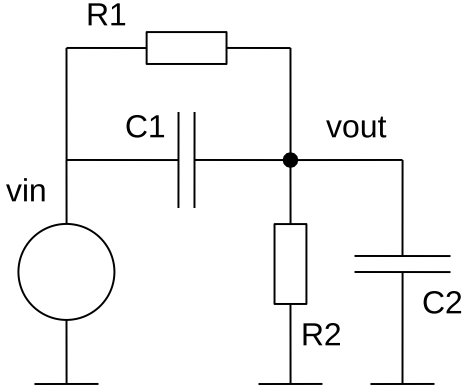




$$v_{out}(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} + \left(\frac{C_1}{C_1 + C_2} - \frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) e^{-t/R_{eq}C_{eq}}$$

- Schneller Spannungsteiler
- Kurz nach dem Einschalten ist die Ausgangsspannung fließt viel Strom durch die Kondensatoren – sie sind an die Spannungsquelle vin kurzgeschlossen. Wir können im diesen kurzen Intervall die Widerstände vernachlässigen. Die Spannung am Ausgang im Moment 0+ ist durch den kapazitiven Spannungsteiler gegeben.

- Schneller Spannungsteiler



$$v_{out}(s) = v_{in}(s)\frac{b_0 + b_1 s}{1 + s((R_1 \parallel R_2)(C_1 \parallel C_2))}$$

$$v_{out}(t) = c_1 + c_2 e^{-t/(R_1 \parallel R_2)(C_1 \parallel C_2)}$$

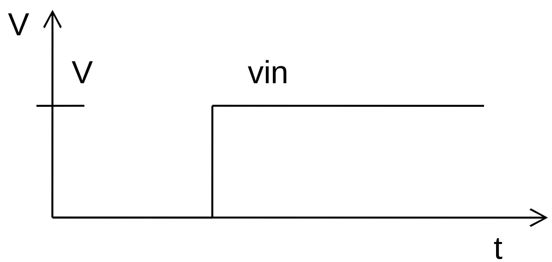
S=0

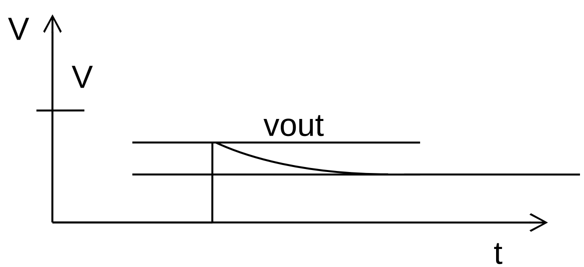
$$v_{out}(\infty) = \frac{R_2}{R_1 + R_2}V \Rightarrow c_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2}V \longrightarrow b_0 = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

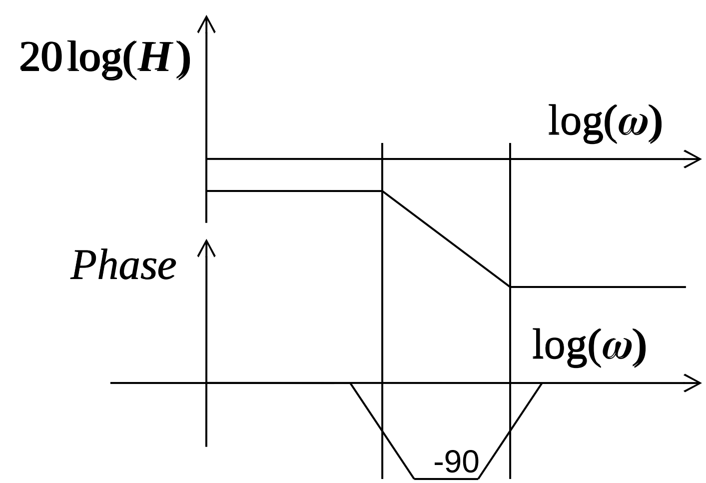
S=unendlich

$$v_{out}(0+) = \frac{C_1}{C_1 + C_2}V \Rightarrow c_1 + c_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2}V \longrightarrow b_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2}R_1C_1$$

$$H(s) = \frac{R_2}{R_1 + R_2}\frac{1 + sR_1C_1}{1 + s(R_1 \parallel R_2)(C_1 + C_2)}$$

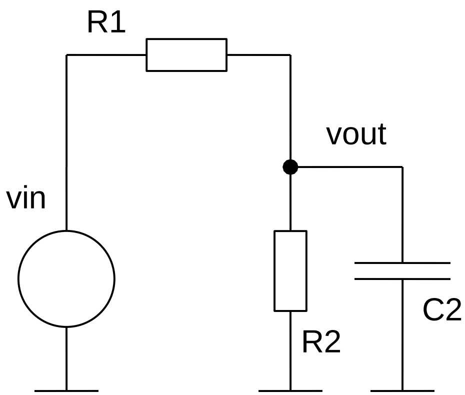


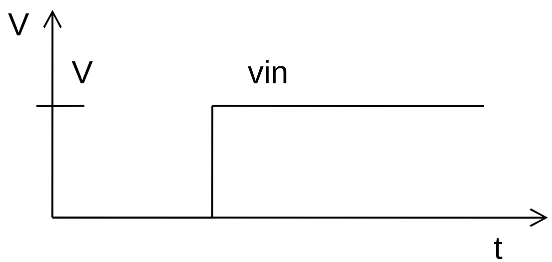


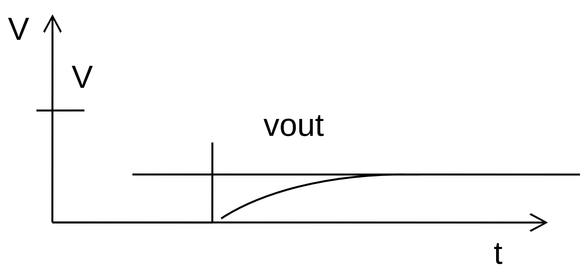


$$v_{out}(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} + \left(\frac{C_1}{C_1 + C_2} - \frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)e^{-t/R_{eq}C_{eq}}$$

- Tiefpass + Spannungsteiler







$$v_{out}(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2}(1 - e^{-t/R_{eq}C_{eq}})$$

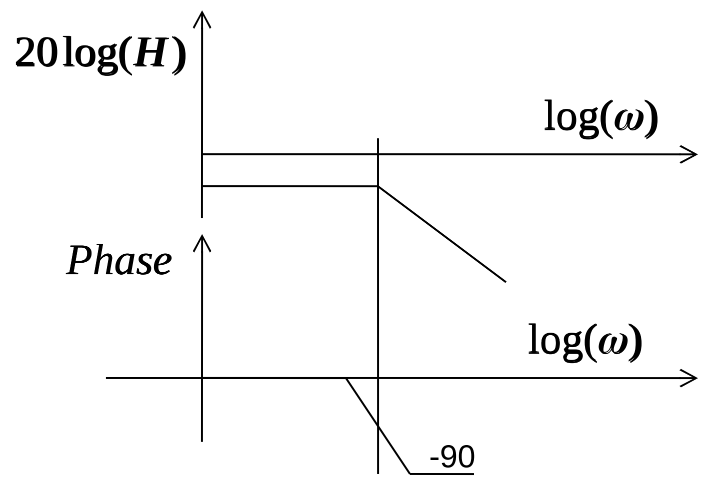
$$v_{out}(s) = v_{in}(s)\frac{b_0 + b_1 s}{1 + s((R_1 \parallel R_2)(C_2))}$$

$$v_{out}(t) = c_1 + c_2 e^{-t/(R_1 \parallel R_2)(C_2)}$$

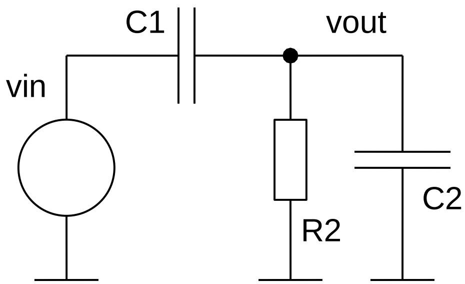
$$v_{out}(\infty) = \frac{R_2}{R_1 + R_2}V \Rightarrow c_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2}V \longrightarrow b_0 = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$v_{out}(0+) = 0 \Rightarrow c_1 + c_2 = 0 \longrightarrow b_1 = 0$$

$$H(s) = \frac{R_2}{R_1 + R_2}\frac{1}{1 + s(R_1 \parallel R_2)(C_2)}$$



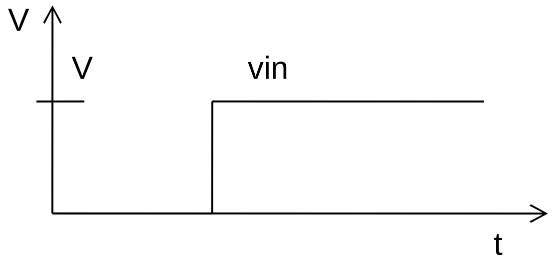
- Hochpass + Spannungsteiler



$$v_{out}(s) = v_{in}(s)\frac{b_0 + b_1 s}{1 + s((R_1 \parallel R_2)(C_1 \parallel C_2))}$$

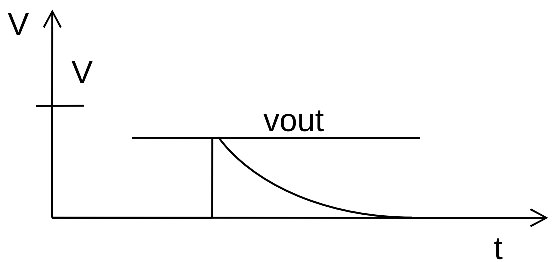
$$v_{out}(t) = c_1 + c_2 e^{-t/(R_2)(C_1 \| C_2)}$$

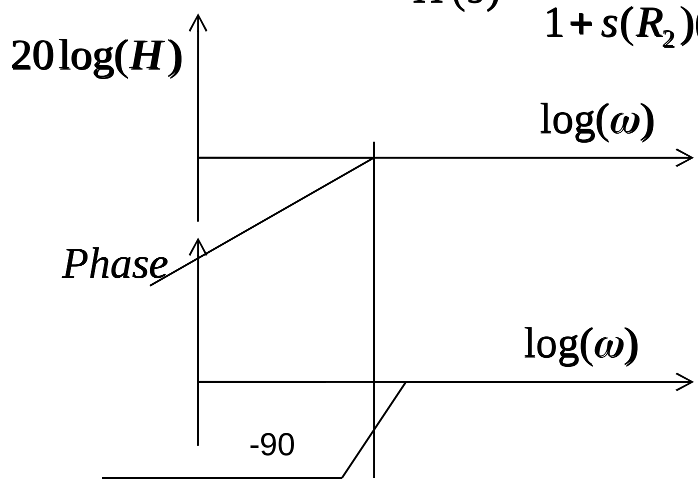
$$v_{out}(\infty) = 0 \Rightarrow c_1 = 0 \longrightarrow b_0 = 0$$



$$v_{out}(0+) = \frac{C_1}{C_1 + C_2}V \Rightarrow c_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2}V \longrightarrow b_1 = R_2 C_1$$

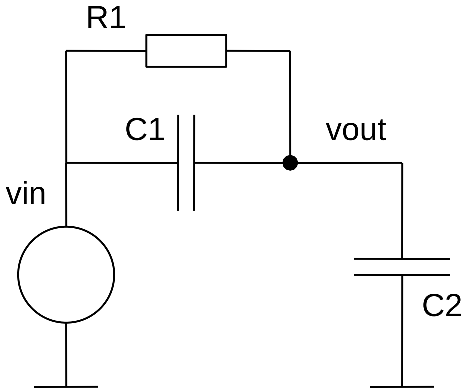
$$H(s) = \frac{sR_2C_1}{1 + s(R_2)(C_1 + C_2)}$$





$$v_{out}(t) = \frac{C_1}{C_1 + C_2} e^{-t/R_{eq}C_{eq}}$$

- Schneller Spannungsteiler (2)

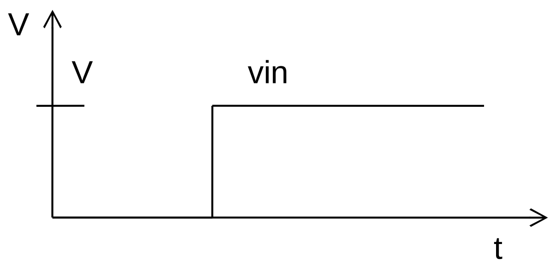


$$v_{out}(s) = v_{in}(s)\frac{b_0 + b_1 s}{1+s((R_1)(C_1 \| C_2))}$$

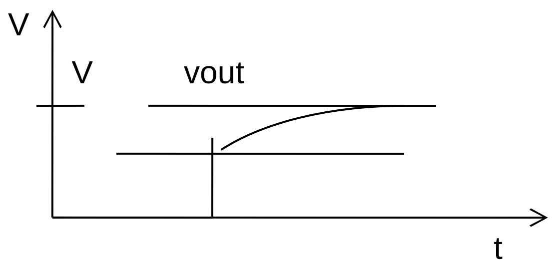
$$v_{out}(t) = c_1 + c_2 e^{-t/(R_1\|R_2)(C_1\|C_2)}$$

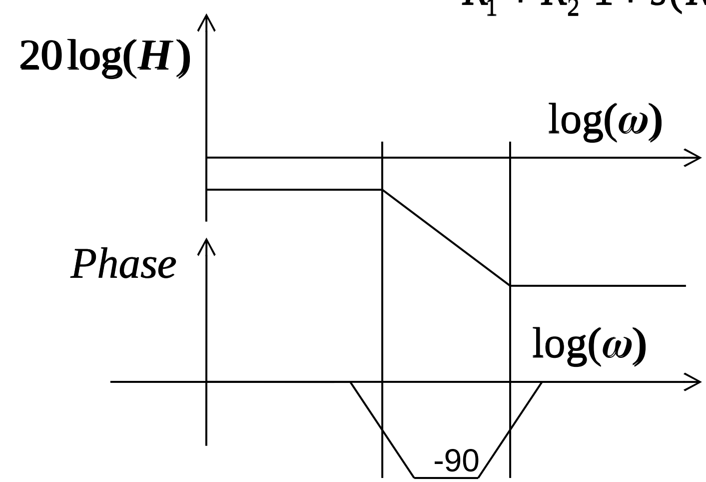
$$v_{out}(\infty) = V \Rightarrow c_1 = 1 \longrightarrow b_0 = 1$$

$$v_{out}(0+) = \frac{C_1}{C_1+C_2}V \Rightarrow c_1 + c_2 = \frac{C_1}{C_1+C_2}V \longrightarrow b_1 = R_1 C_1$$



$$H(s) = \frac{R_2}{R_1+R_2}\frac{1+sR_1C_1}{1+s(R_1)(C_1+C_2)}$$





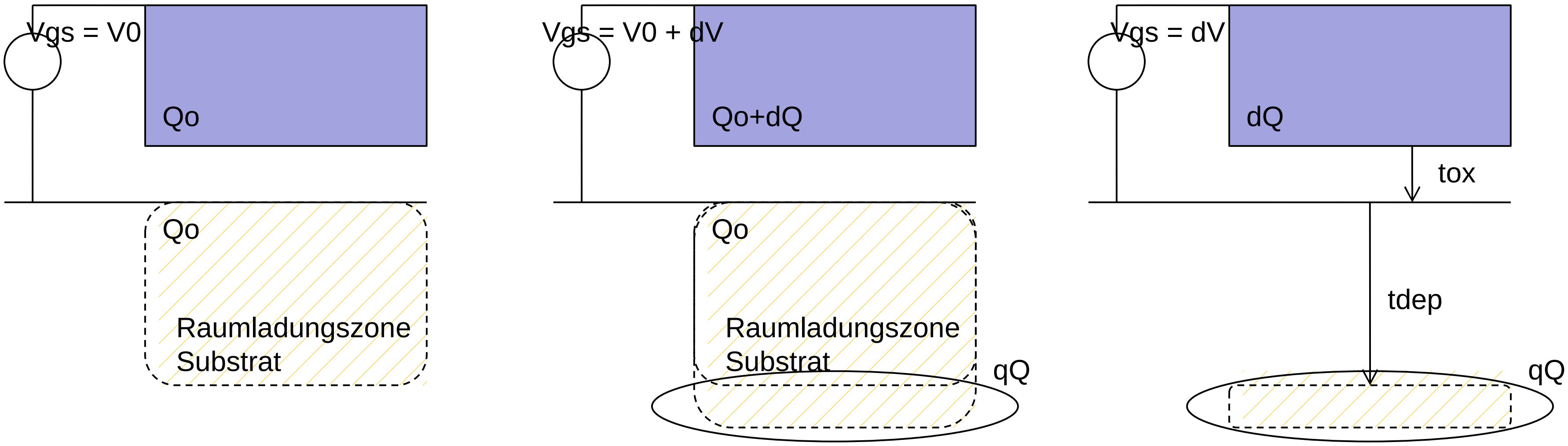
$$v_{out}(t) = \frac{R_2}{R_1+R_2} + \left(\frac{C_1}{C_1+C_2} - \frac{R_2}{R_1+R_2}\right)e^{-t/R_{eq}C_{eq}}$$

Ladung im Raumladungszone und dynamische Kapazität

- Dynamische Kapazitäten

Cdynamic = dQ/dV

Cdep_dyn = epsilon/tdep
Nächste Folie



Dynamische Kapazität von Raumladungszone

- …

$$\frac{dQ}{dV} = C_{dyn}$$

$$C_{dyn} = \frac{\varepsilon}{t}$$

$$Q = const \cdot t$$

$$C_{dyn} = const / Q$$

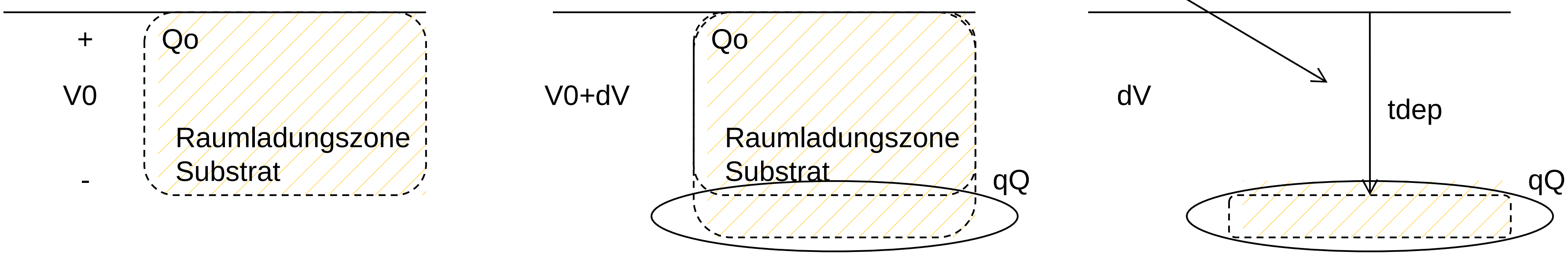
$$\frac{dQ}{dV} = const / Q$$

$$QdQ = const \cdot dV$$

$$\frac{1}{2} Q^2 = const \cdot V$$

$$Q = \sqrt{2 \cdot const \cdot V}$$

$$C_{dyn} = \frac{dQ}{dV} = \frac{d(\sqrt{2 \cdot const \cdot V})}{dV} = \frac{\sqrt{2 \cdot const \cdot V}}{2\sqrt{V}} = \frac{1}{2}\frac{Q}{V}$$



Dynamische Kapazität von Raumladungszone

- Dicke der Raumladungszone und deren Ladung hängen als Quadratwurzel von der Spannung in der Zone V
- Die Ladung der Zone ist durch die Formel 2 * Cdyn * V gegeben
- Man kann näherungsweise Cdyn anstatt normaler Kapazität verwenden
- Wir haben deshalb überall Cdep_dyn verwendet

$$Q = \sqrt{2 \cdot const \cdot V}$$

$$2C_{dyn}V = Q$$