

Differenzverstärker

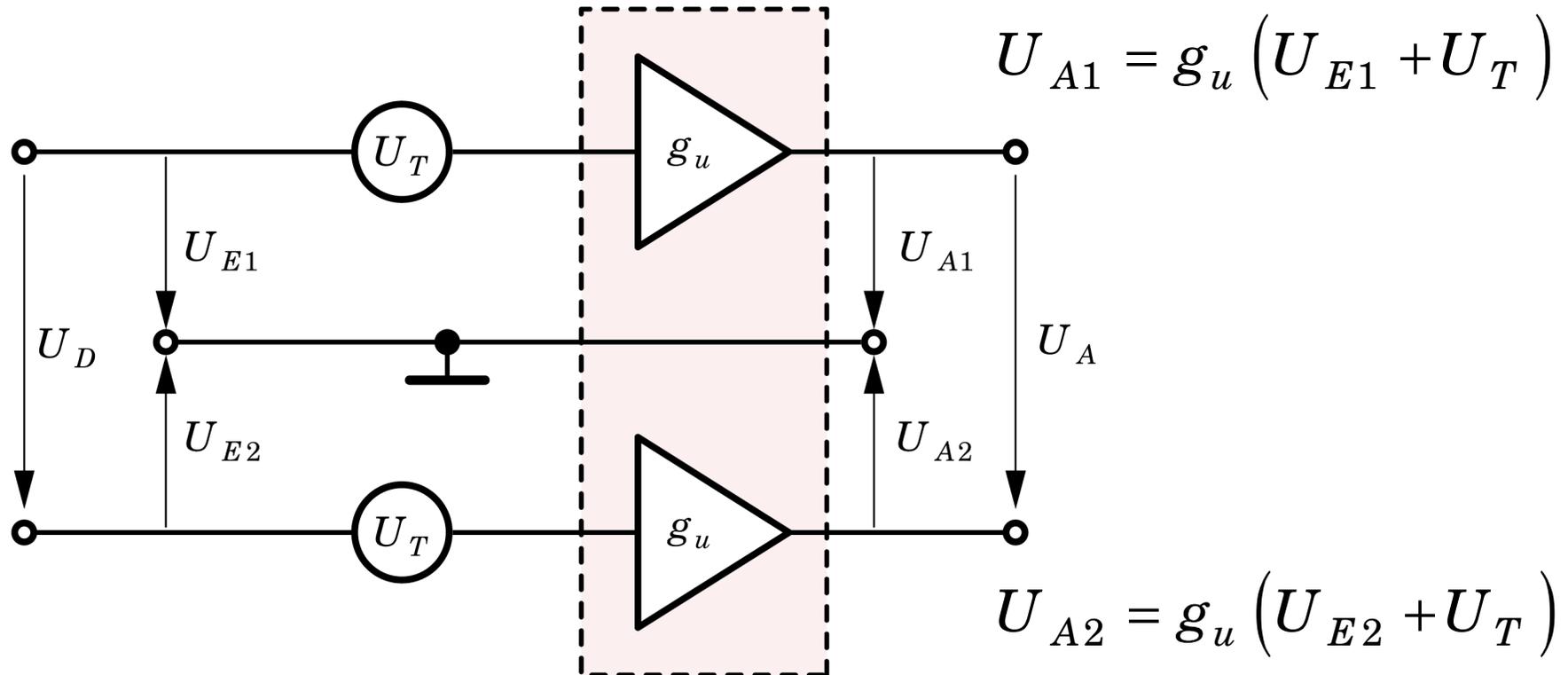
Problem der Verstärkung kleiner Gleichspannungen

Verwendung zweier exakt gleicher, thermisch eng gekoppelter Verstärker als sog. Differenzverstärker

Ausgangsspannungsdifferenz ist nur von der Eingangsspannungsdifferenz abhängig.

Gesamter Temperatureinfluß durch eine

temperaturabhängige Spannungsquelle U_T
am Eingang berücksichtigt



Differenzeingang → Differenzausgang

Nur thermische Kopplung

keinerlei elektrische Verbindung

zwischen den beiden Verstärkern.

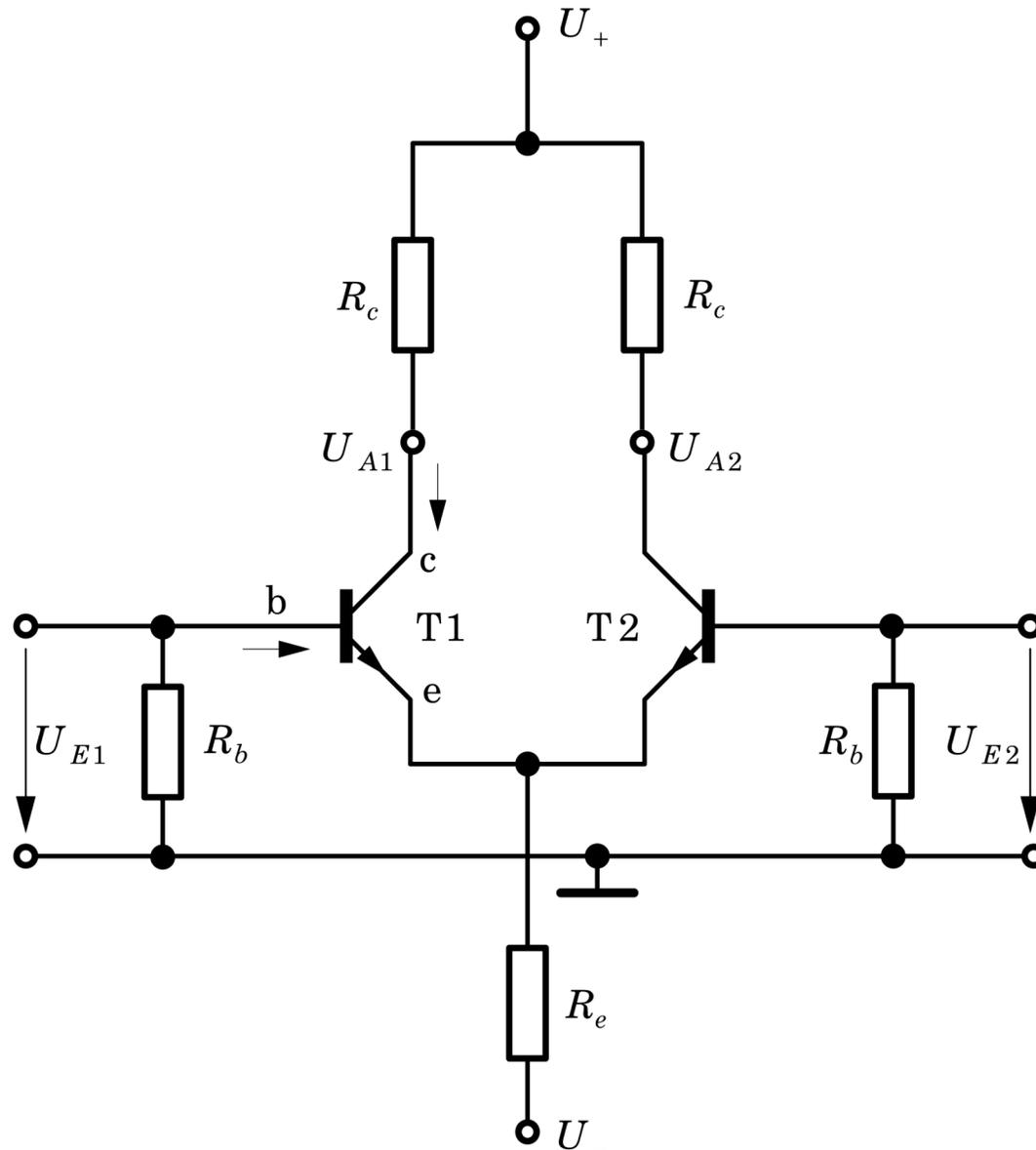
$$U_A = g_u (U_{E1} - U_{E2}) = g_u U_D$$

NT: kleine Differenzen U_D von großen Einspannungsspannungen U_{E1}
bzw. U_{E2} können diesen Differenzverstärker leicht in die Aussteuergrenze
treiben \Rightarrow **Übersteuerung**

Gleichtakt-Eingangsspannung
Mittelwert der beiden Eingangsspannungen

$$U_{GT} = \frac{U_{E1} + U_{E2}}{2}$$

wird genauso wie U_D mit g_u verstärkt



$$U_{E1} = U_{E2} = 0 \Rightarrow$$

$$U_{R_e} = U_- - U_{be}$$

$$I_{e1} = I_{e2} = I_e / 2$$

$$I_{e1} = I_{c1} + I_{b1} \cong I_{c1}$$

$$I_{c1} = I_{c2}$$

$$U_{A1} = U_+ - I_{c1} R_c$$

$$U_{A2} = U_+ - I_{c2} R_c$$

$$U_A = U_{A1} - U_{A2} = 0$$

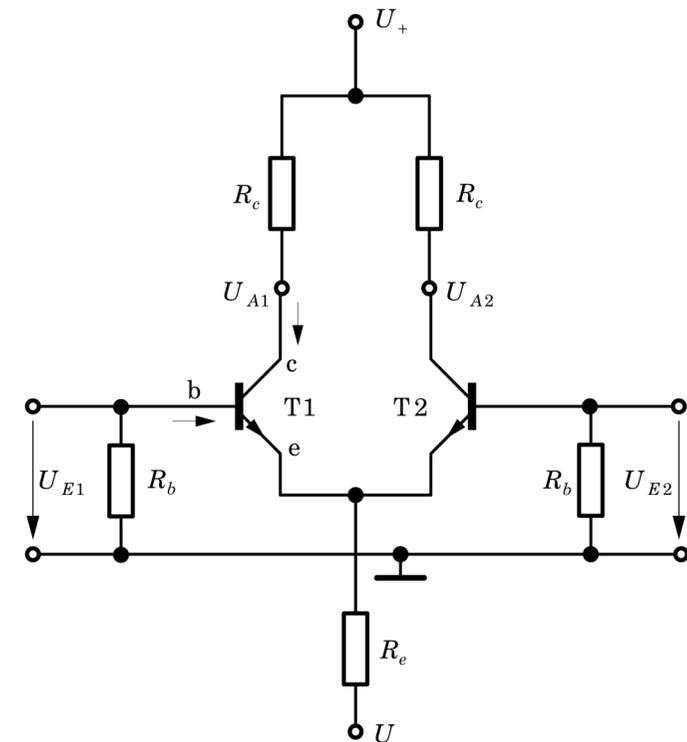
Betrachtung kleiner, ansonsten aber beliebiger Eingangsspannungen

die wir uns in ein **Gleichtaktspannung** $U_{GT} = \frac{U_{E1} + U_{E2}}{2}$

und eine **Differenzspannung** $U_D = U_{E1} - U_{E2}$
aufgeteilt denken

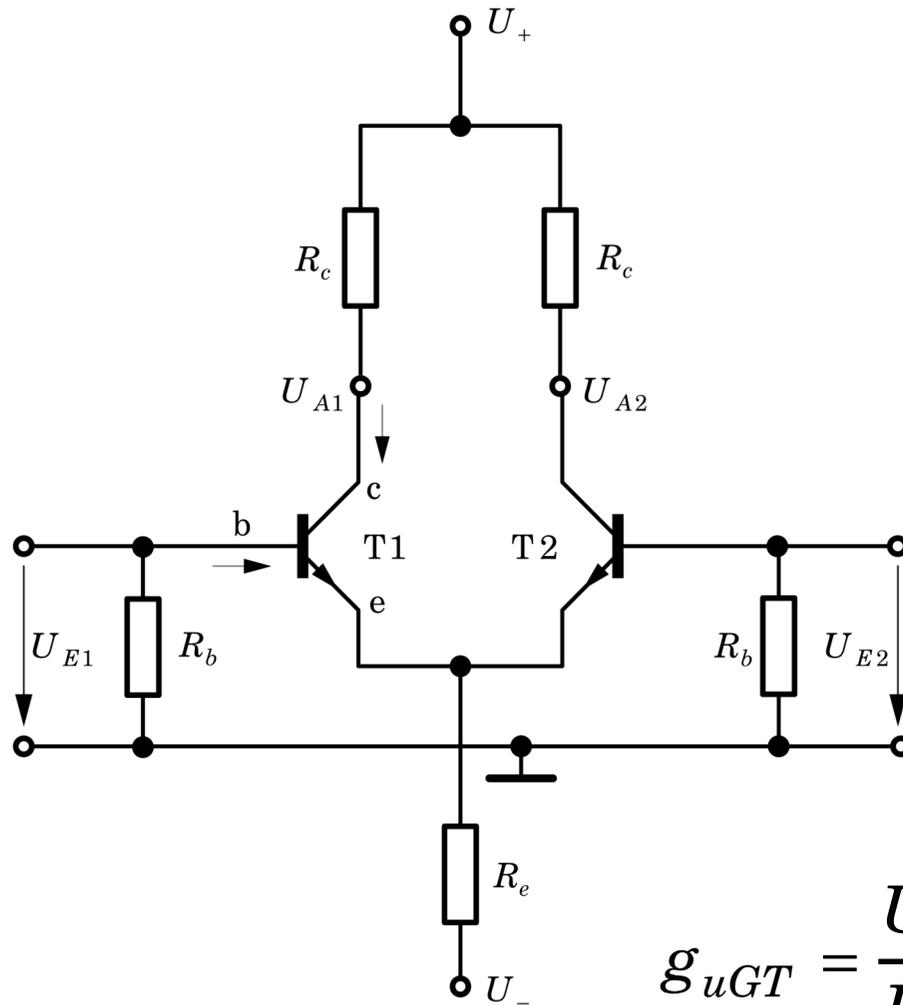
Gleichtaktspannung U_{GT} wirkt auf beide Transistoren
gleichsinnig. Gemeinsamer Emitterwiderstand R_e auf
2 einzelne parallelgeschaltete Emitterwiderstände $2R_e$
für jeden Transistor aufgeteilt gedacht $2R_e \parallel 2R_e = R_e$

Bei gleichsinnigen Änderungen (bei konstant gehaltener
Differenz) der Eingangsspannungen \Rightarrow Verbindung
zwischen den beiden parallelgeschalteten Widerständen
stromlos \Rightarrow aufgetrennt gedacht.



2 unabhängige Verstärkerstufen

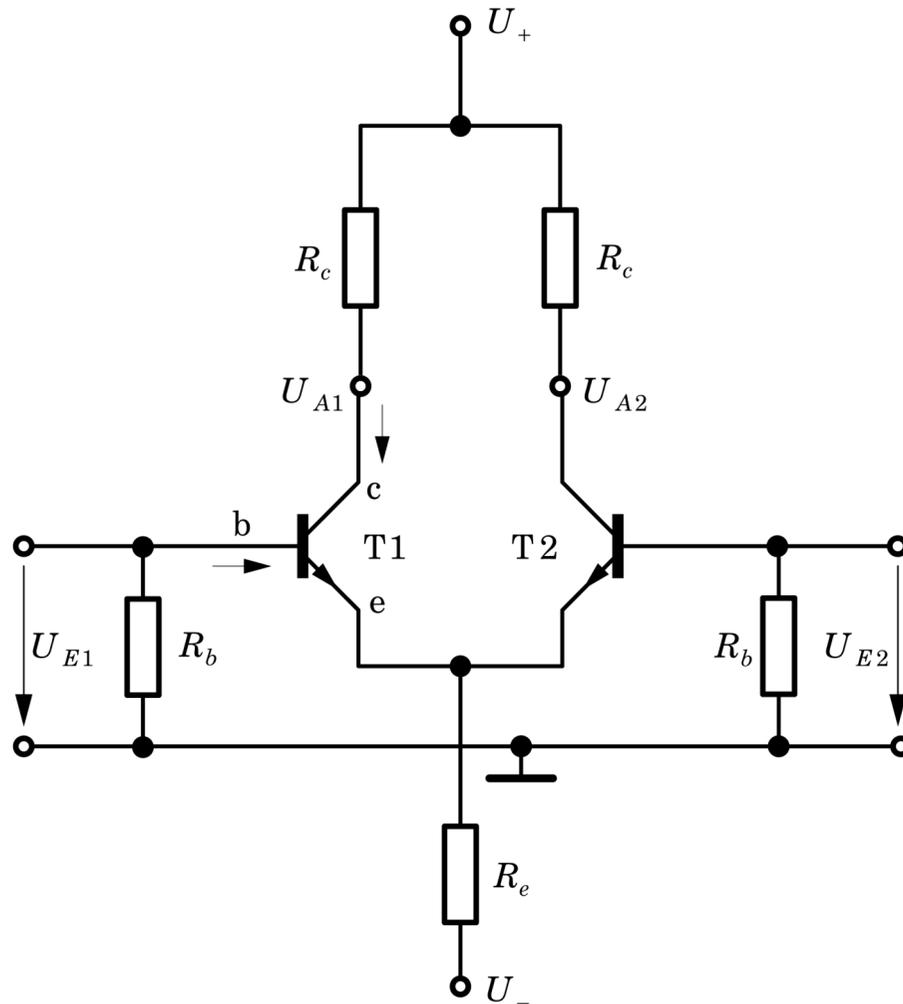
Spannungsverstärkung $- R_c/2R_e$



$$U_{A1} = -\frac{R_c}{2R_e} U_{E1}$$

$$U_{A2} = -\frac{R_c}{2R_e} U_{E2}$$

$$g_{uGT} = \frac{U_{AGT}}{U_{EGT}} = \frac{\frac{U_{A1} + U_{A2}}{2}}{\frac{U_{E1} + U_{E2}}{2}} = -\frac{R_c}{2R_e}$$



Bei konstanter Gleichakt-Eingangsspannung gilt für die Verstärkung von (kleinen) Differenzspannungen:

$$U_{E1} + U_- = U_{be1} + U_{R_e}$$

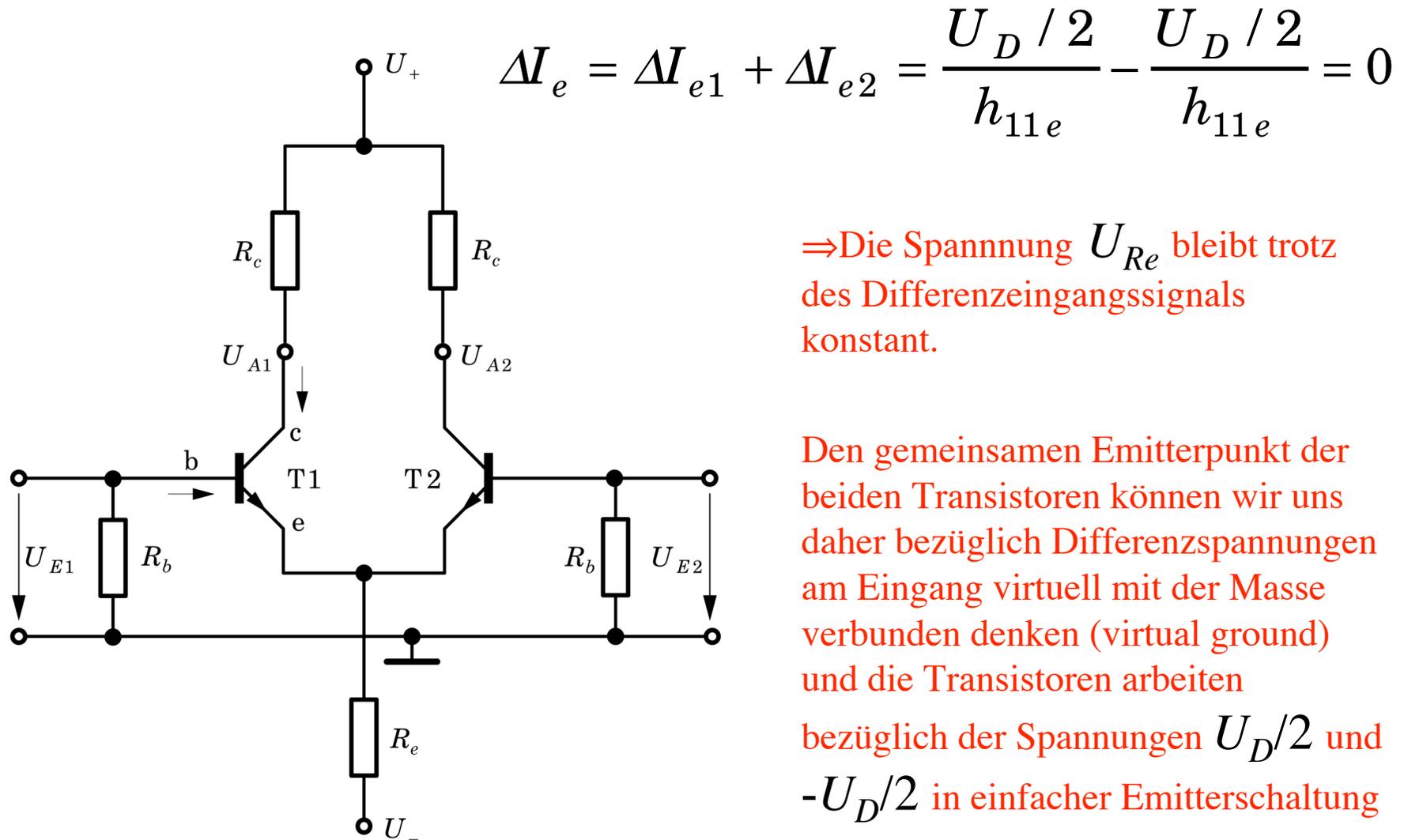
$$U_{E1} - U_{be1} =$$

$$U_{R_e} - U_- = U_{E2} - U_{be1}$$

$$U_{E1} - U_{be1} =$$

$$U_{R_e} - U_- = U_{E2} - U_{be1}$$

Wir denken uns nun U_D in $\Delta U_{be1} = U_D/2$ und $\Delta U_{be2} = -U_D/2$ aufgeteilt



⇒ Die Spannung U_{Re} bleibt trotz des Differenzeingangssignals konstant.

Den gemeinsamen Emitterpunkt der beiden Transistoren können wir uns daher bezüglich Differenzspannungen am Eingang virtuell mit der Masse verbunden denken (virtual ground) und die Transistoren arbeiten bezüglich der Spannungen $U_D/2$ und $-U_D/2$ in einfacher Emitterschaltung

$$\Delta U_{A1} = -R_c \Delta I_{c1} = -R_c \beta \Delta I_{b1} = \frac{-R_c \beta}{h_{11e}} \Delta U_{b1} =$$

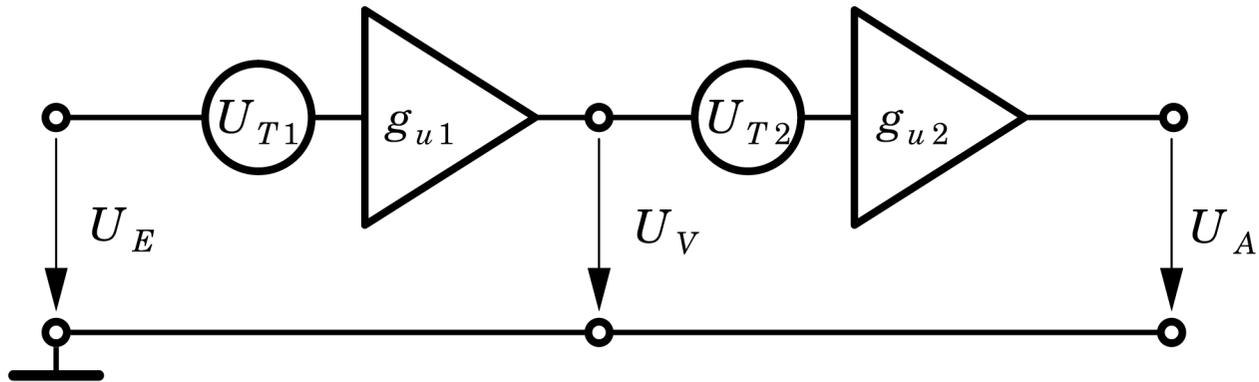
$$g_{uD} \Delta U_{b1} = g_{uD} \Delta U_D / 2$$

$$\Delta U_{A2} = -g_{uD} \Delta U_D / 2$$

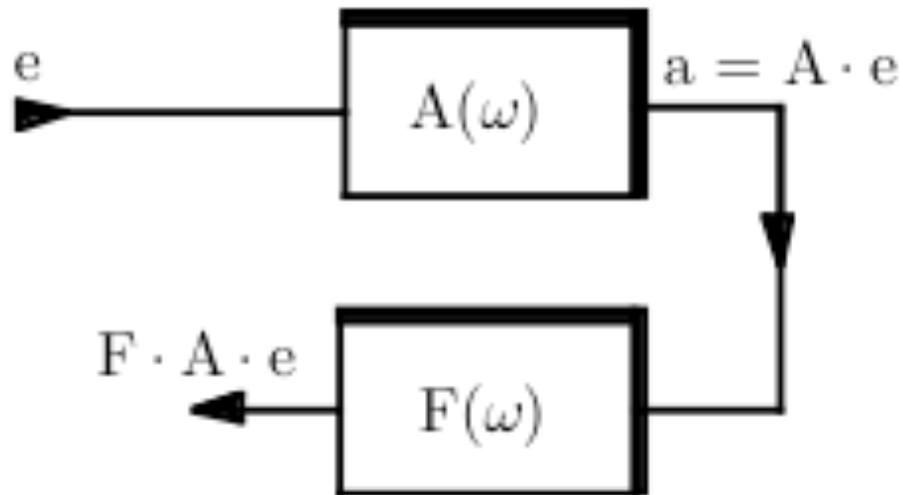
$$\Delta U_A = \Delta U_{A1} - \Delta U_{A2} = g_{uD} \Delta U_D$$

$$g_{uD} = -\frac{\beta R_c}{h_{11e}}, \quad (h_{11e} = r_{be})$$

Unter **Gleichtaktunterdrückung** (common mode rejection ratio CMRR) versteht man das Verhältnis aus Differenzverstärkung zu Gleichtaktverstärkung:



Rückkopplung - Harmonische Oszillatoren

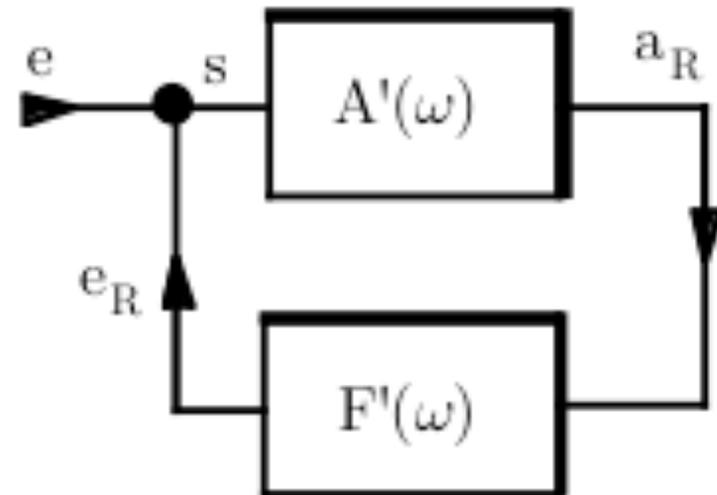


$$a = Ae \quad FAe$$

a Ausgangsgröße

e Eingangsgröße

s Steuergröße



$$A(\omega) \rightarrow A'(\omega)$$

$$F(\omega) \rightarrow F'(\omega)$$

$$s = e + F' a_R$$

$$a_R = A' s = A' e + A' F' a_R$$

$$a_R = A' s = A' e + A' F' a_R$$

$$a_R = \frac{A'}{1 - A' F'} = A_R e$$

$$1 - A' F' = 0 \quad \Rightarrow \quad e \rightarrow 0$$

$$A' F' = 1$$

Rückkopplung **feed back**

Mitkopplung **positive**

Gegenkopplung **negative**

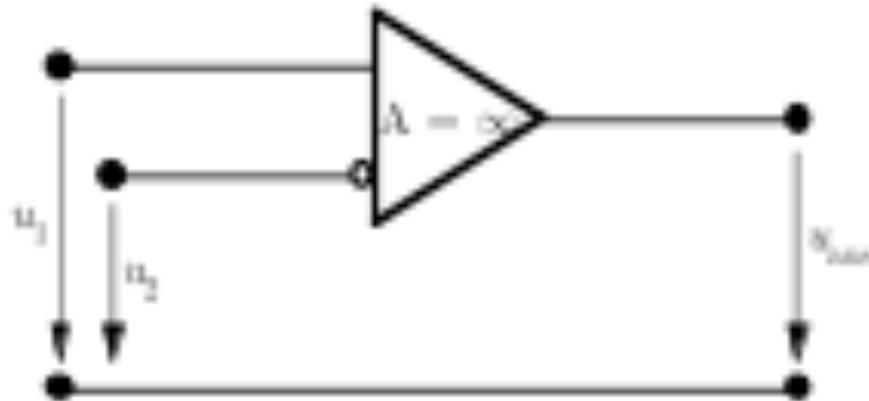
A_R Wirksame
Übertragungsfunktion

Bei Nullwerden des Nenners
Kreis- oder
Schleifenverstärkung der
Rückkopplungsschaltung = 1

Rückkopplungsbedingung für
den harmonischen Oszillator

Operationsverstärker OV

Operational Amplifier OpAmp



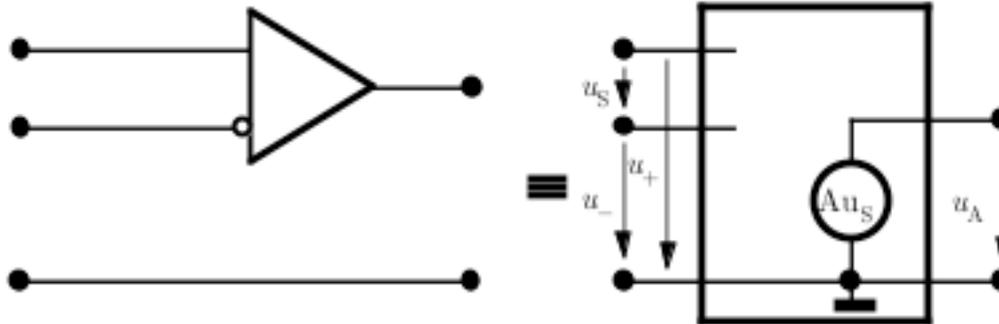
Differenzverstärker
Geradeausverstärkung

Open Loop Gain

100 000 ... 100 000 000

Differenzspannungs-
verstärkung ohne
Gegenkopplung

Idealer Operationsverstärker



Ohne Gegenkopplung (open loop)
funktioniert der OV als
Komparator:

$$u_+ > u_- \Rightarrow u_A \rightarrow +\infty (+U_0)$$

$$u_+ < u_- \Rightarrow u_A \rightarrow -\infty (-U_0)$$

Schaltsymbol des idealen OV

Geradeausverstärkung

$$A = g_u \rightarrow \infty$$

Eingangsimpedanz

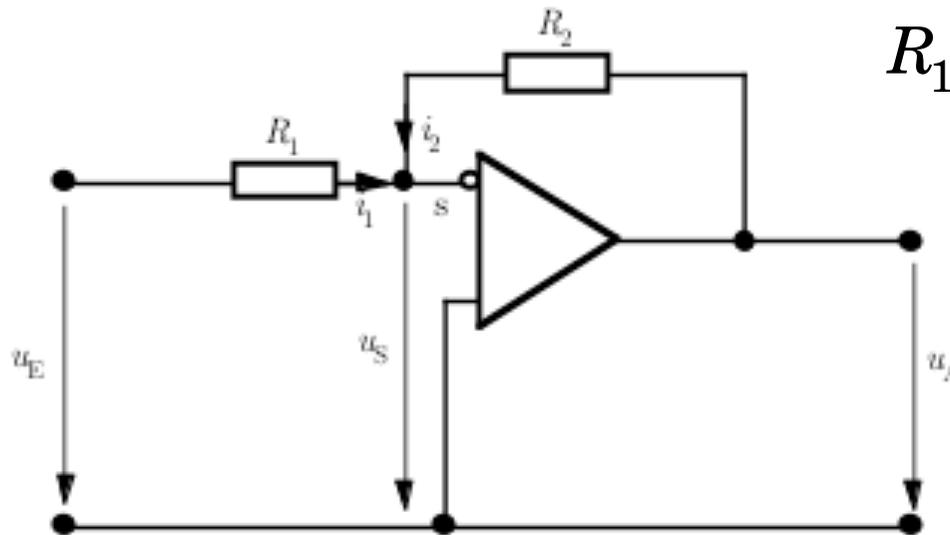
$$Z_E \rightarrow \infty$$

Ausgangsimpedanz

$$Z_A = 0$$

Invertierender Eingang o -
Nichtinvertierender Eingang

Invertierende Operationsverstärkerschaltung



$R_1 \quad R_2 \quad i_1 \quad i_2 \quad u_S \quad u_E \quad u_A \quad g_0$

$$u_A = g_0 u_S$$

$$u_A = g u_E$$

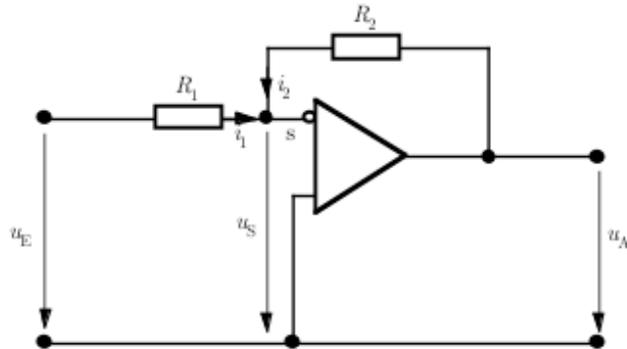
$$u_S = u_E - i_1 R_1$$

$$i_1 = -i_2 = -\frac{u_A - u_S}{R_2}$$

$$u_S = u_E + \frac{u_A}{R_2} R_1 - \frac{u_S}{R_2} R_1$$

$$u_S = \frac{u_E + u_A \frac{R_1}{R_2}}{1 + \frac{R_1}{R_2}}$$

Invertierende Operationsverstärkerschaltung



$$u_A = g_0 u_S$$

$$u_S = \frac{u_E + u_A \frac{R_1}{R_2}}{1 + \frac{R_1}{R_2}}$$

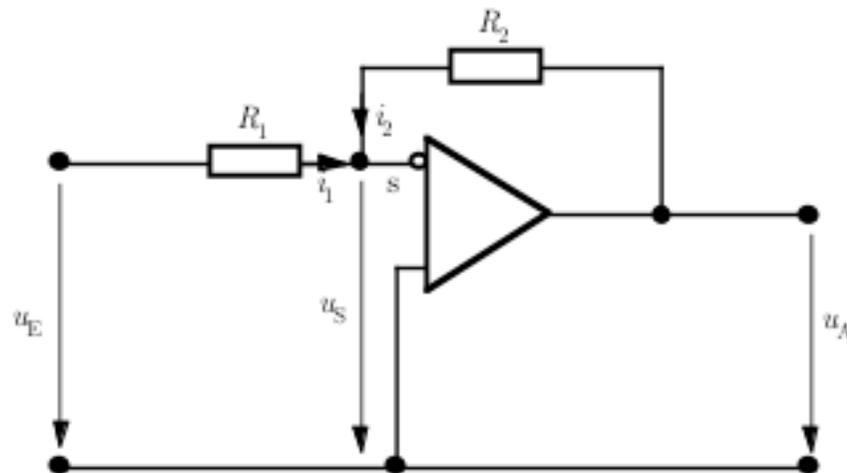
$$u_A \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) = g_0 u_E + g_0 u_A \frac{R_1}{R_2}$$

$$u_A \left(1 + \frac{R_1}{R_2} - g_0 \frac{R_1}{R_2} \right) = g_0 u_E$$

$$\lim_{g_0 \rightarrow \infty} g = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$g = \frac{u_A}{u_E} = \frac{g_0}{1 + \frac{R_1}{R_2} - g_0 \frac{R_1}{R_2}} = \frac{R_2}{\frac{R_1 + R_2}{g_0} - R_1}$$

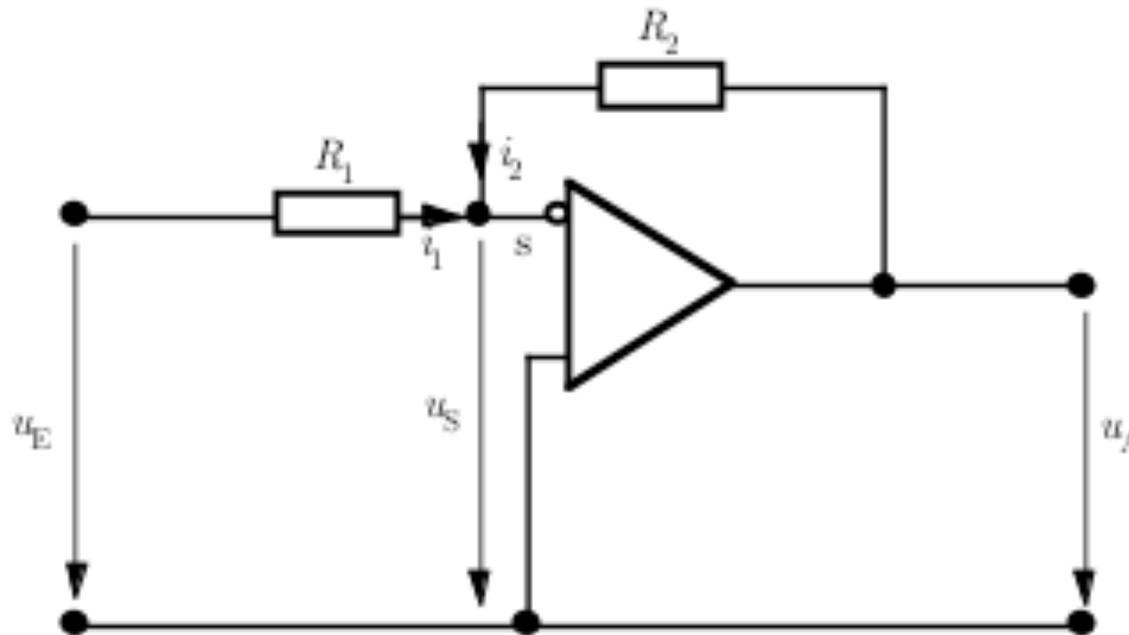
Summenpunktregeln



$$\lim_{g_0 \rightarrow \infty} g = -\frac{R_2}{R_1}$$

1. In keinen der OV-Eingänge kann ein Strom fließen
2. Zwischen den beiden OV-Eingängen kann sich bei geschlossener Rückkopplungsschleife keine Spannung ausbilden (virtueller Kurzschluss)

Invertierende Operationsverstärkerschaltung



$$i_1 = -i_2$$

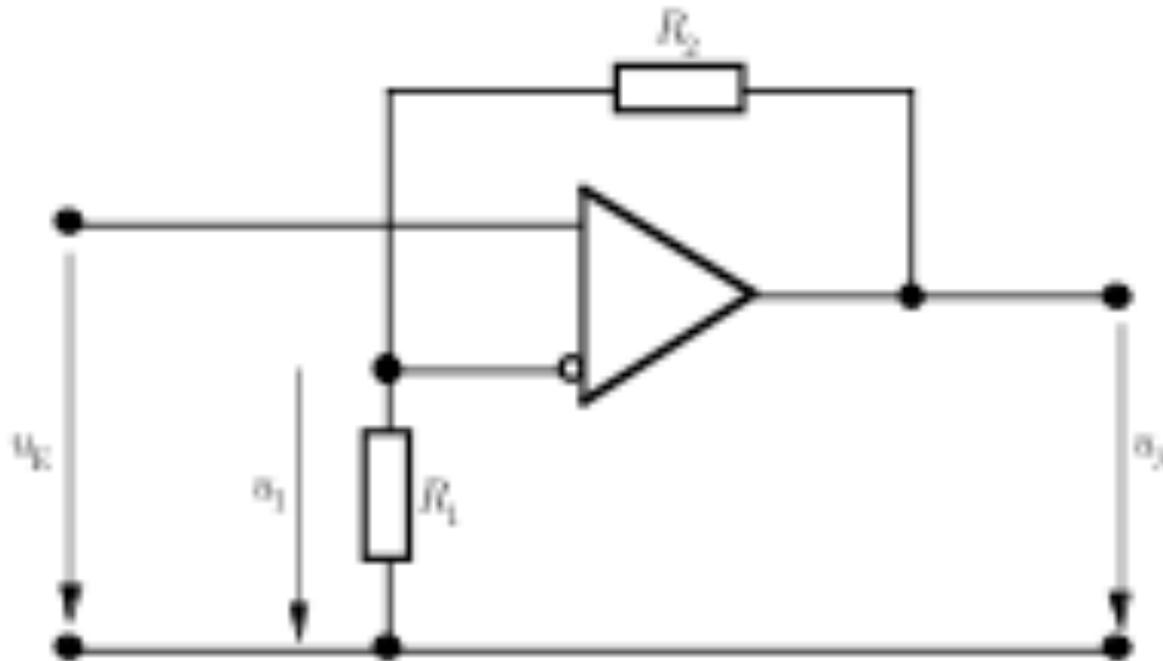
$$i_1 = \frac{u_E}{R_1}$$

$$i_2 = \frac{u_A}{R_2}$$

$$\frac{U_E}{R_1} = -\frac{U_A}{R_2} \Rightarrow \frac{U_A}{U_E} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Der Eingangswiderstand der Schaltung ist wegen des virtuellen Kurzschlusses zwischen den OV-Eingängen gleich R_1 .

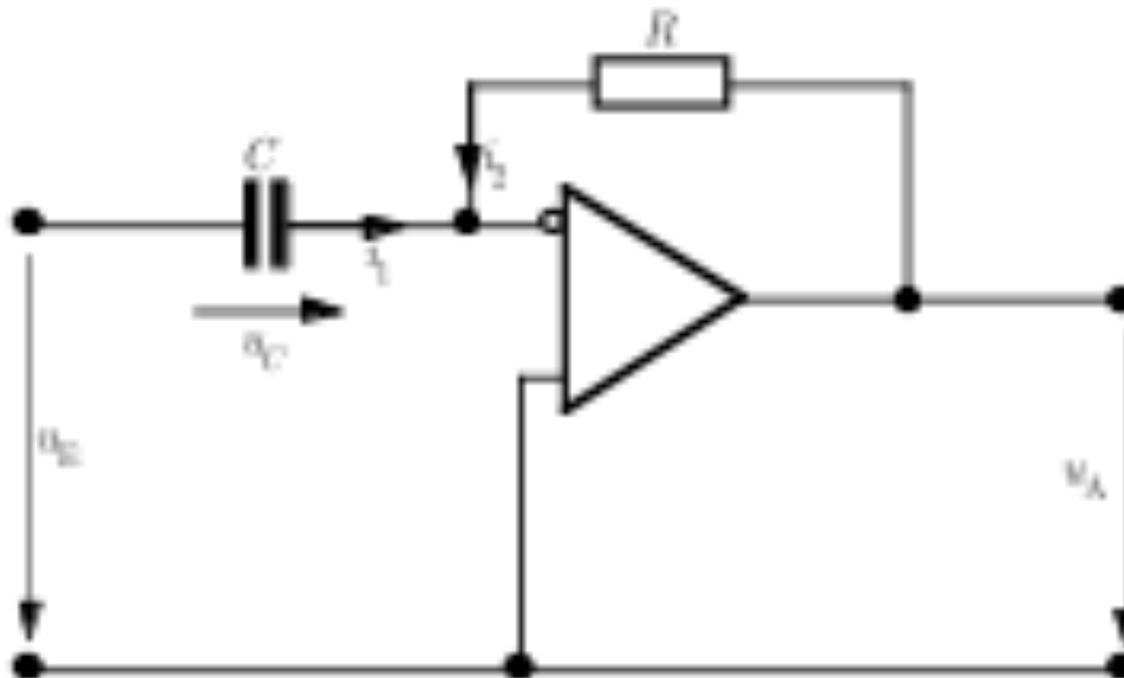
Nichtinvertierende Operationsverstärkerstärkerschaltung Elektrometerverstärkerschaltung



$$\frac{u_A}{u_E} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

Da kein Strom in den invertierenden Eingang des OV fließt, bilden R2 und R1 einen einfachen, nicht belasteten Spannungsteiler.

Differenzierschaltung

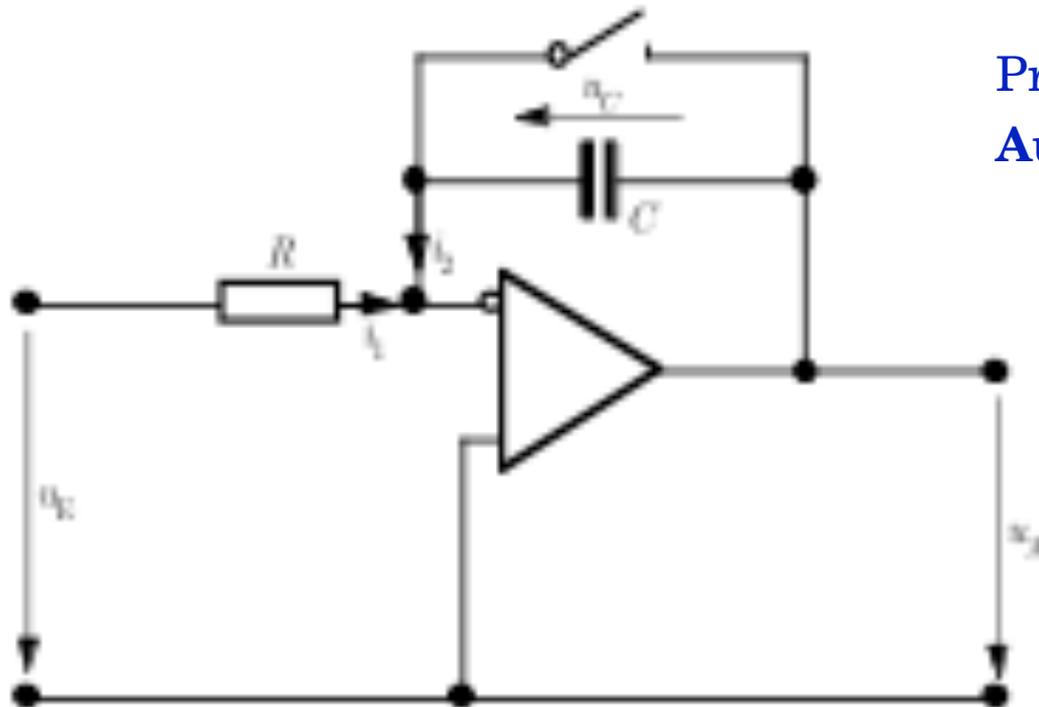


Schaltsymbol des
idealen OV

$$u_A = -RC \frac{du_E}{dt}$$

$$i_1 = C \frac{du_C}{dt} = C \frac{du_E}{dt} = -i_2 = -\frac{u_A}{R}$$

Integrierschaltung

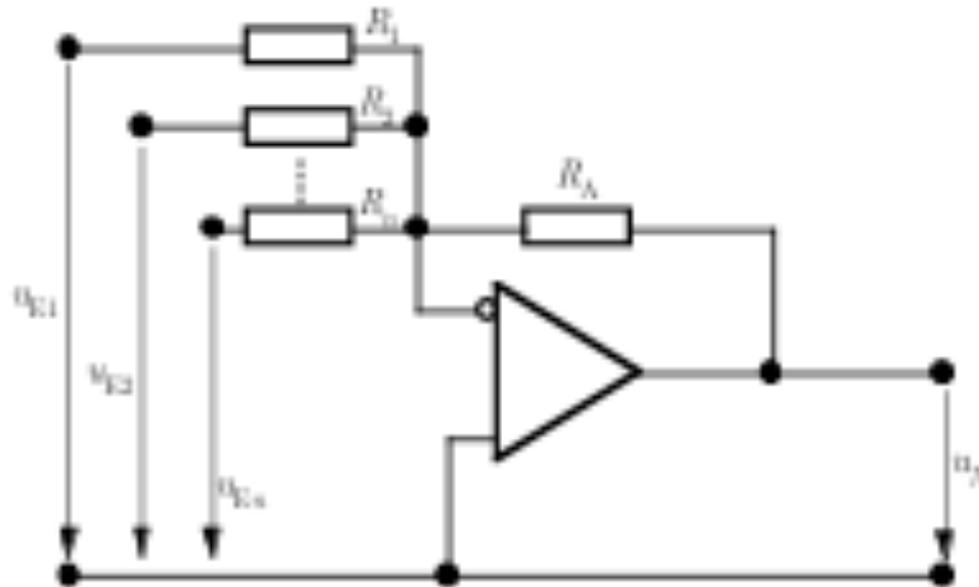


Problem:
Ausgangs-Offset-Spannung

$$u_A = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_E dt'$$

$$i_1 = \frac{u_E}{R} = -i_2 = -C \frac{du_C}{dt} = -C \frac{du_A}{dt}$$

Summierschaltung



Addition von Spannungen mit einem gemeinsamen Bezugs-(Masse-)Punkt.

Aus den beiden Summenpunktregeln folgt direkt:

$$\frac{u_{E1}}{R_1} + \frac{u_{E2}}{R_2} + \dots + \frac{u_{En}}{R_n} = -\frac{u_A}{R_A}$$

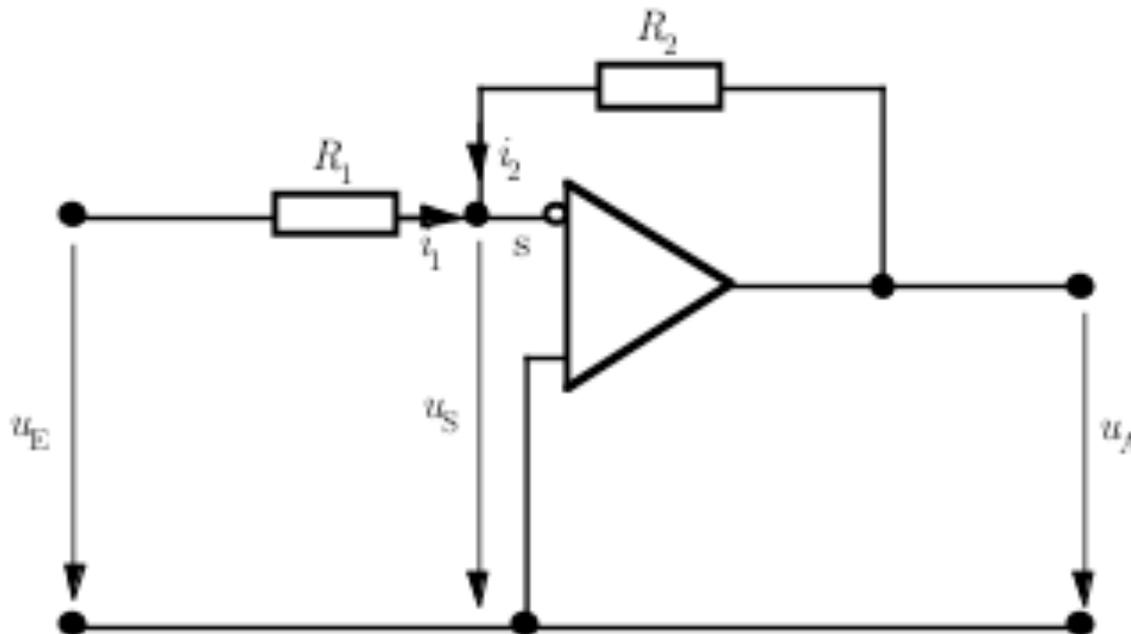
Für

folgt

$$R_1 = R_2 = \dots R_n = R_A = R \quad \Rightarrow \quad u_A = -\sum_{k=1}^n u_{Ek}$$

Invertierende Operationsverstärkerschaltung

⇒ **Inverter**



$$\dot{i}_1 = -\dot{i}_2$$

$$\dot{i}_1 = \frac{u_E}{R_1}$$

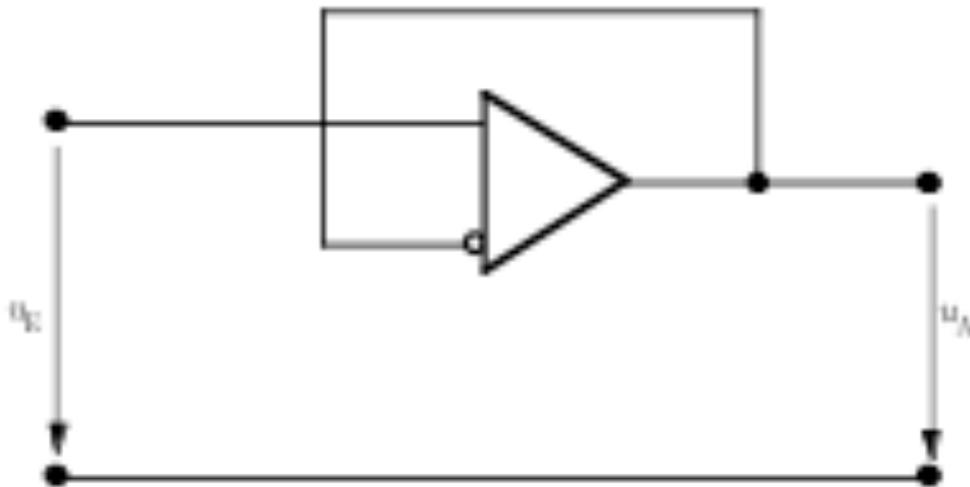
$$\dot{i}_2 = \frac{u_A}{R_2}$$

$$\frac{U_E}{R_1} = -\frac{U_A}{R_2} \Rightarrow \frac{U_A}{U_E} = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$R_1 = R_2 \Rightarrow U_A = -U_E$$

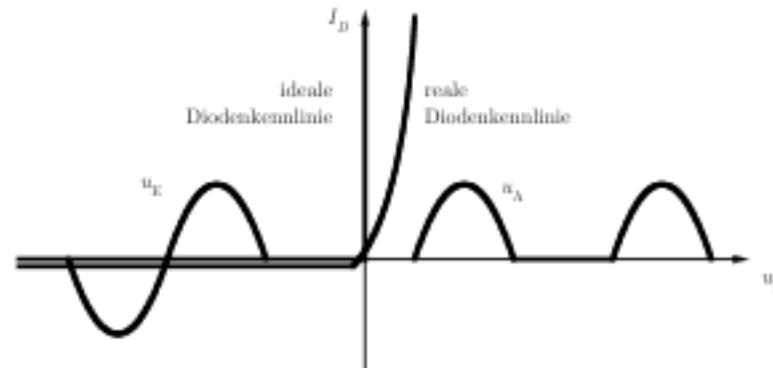
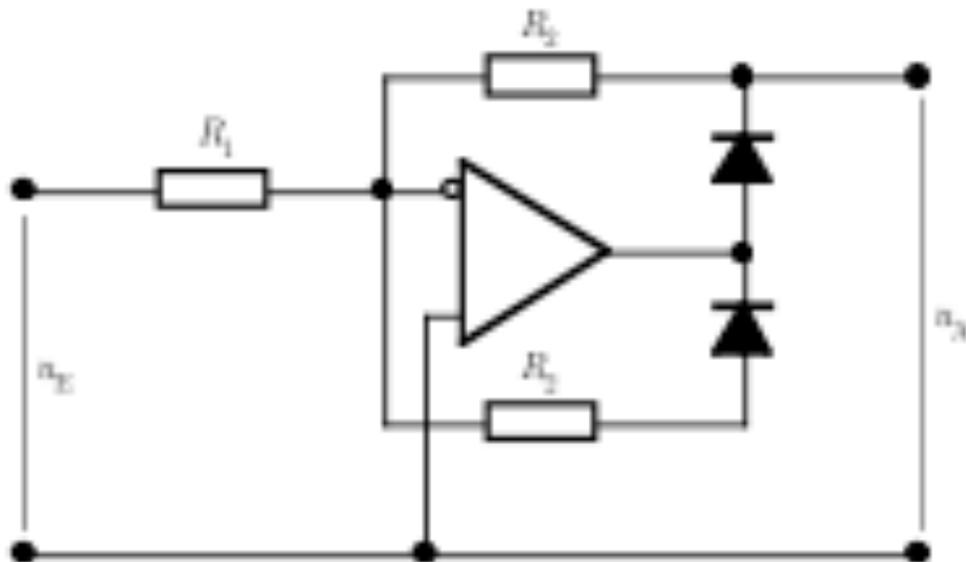
durch Vorzeichenwechsel
wird auch die Subtraktion
einer
Spannung realisierbar.

Spannungsfolger

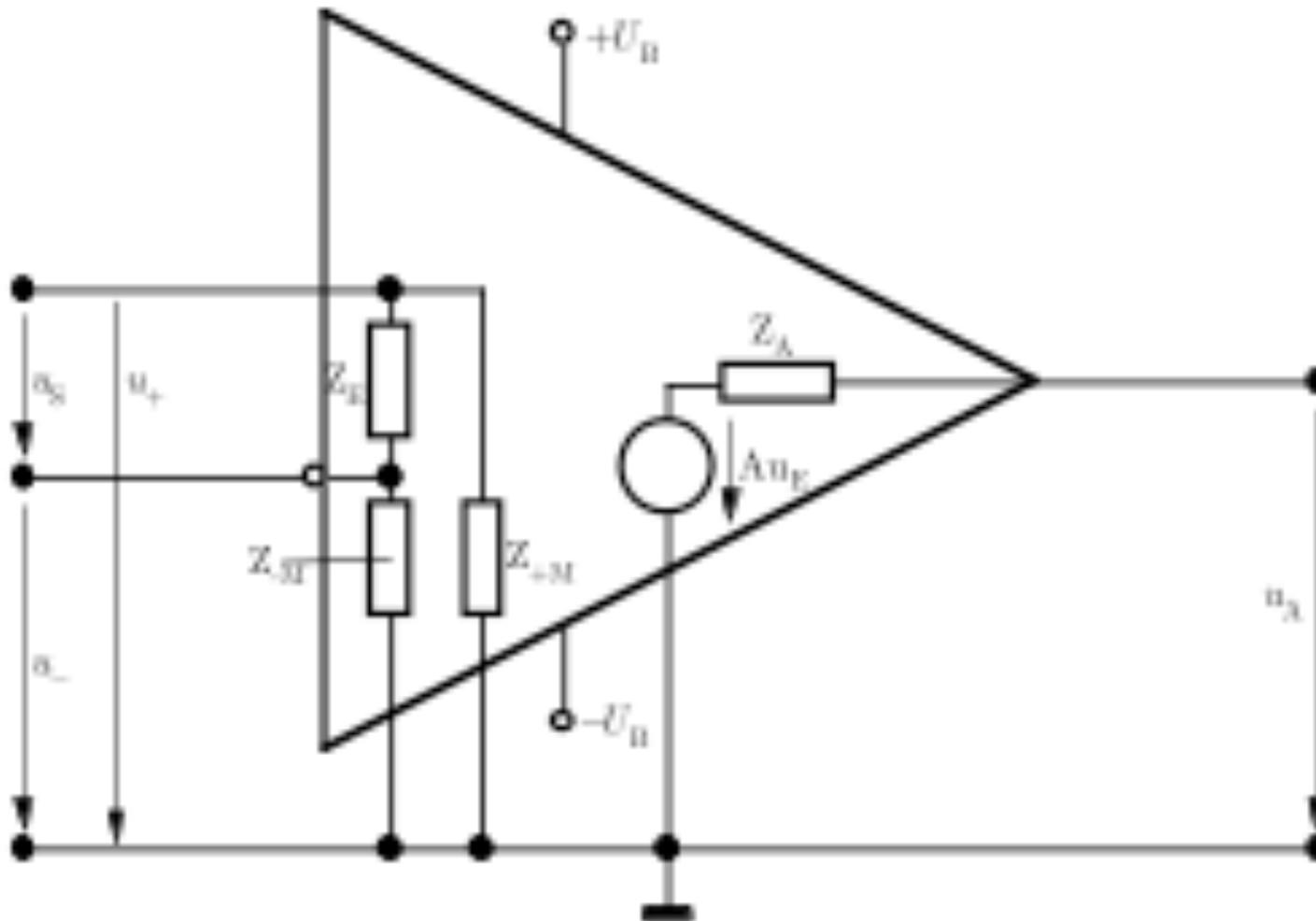


$$u_A \equiv u_E$$

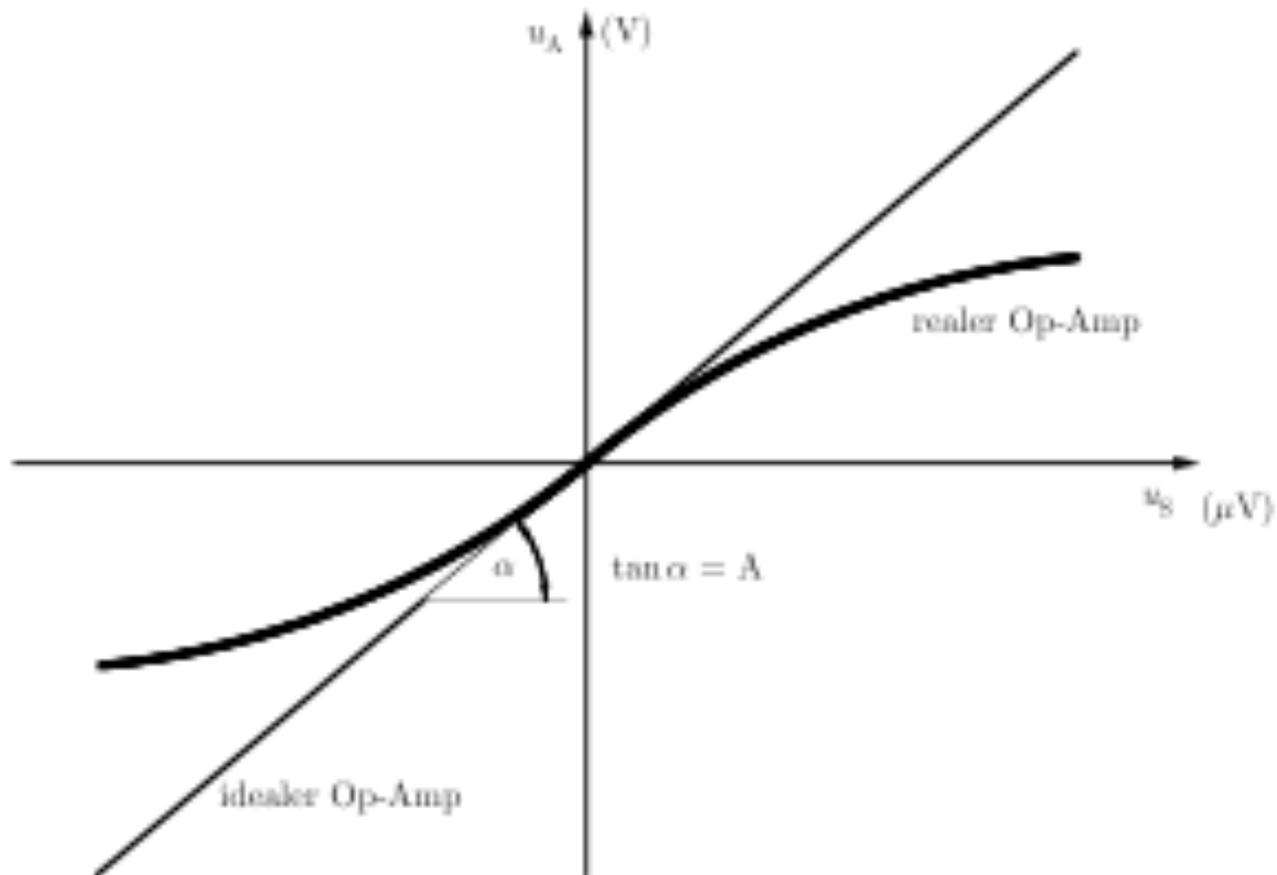
Idealer Gleichrichter



Realer Operationsverstärker



Realer Operationsverstärker



Realer Operationsverstärker

Geradeausverstärkung **Open Loop Gain**

$$A[\text{dB}] = 20 \log \frac{u_A}{u_S} \quad \text{typ. } 10^6$$

Frequenzabhängigkeit

Frequenzkompensation **Frequency compensation**

$$\mathbf{A} = A(\omega)e^{j\psi(\omega)}$$

Eingangsimpedanz

$$Z_E \approx 10^4 \dots 10^9 \Omega$$

Ausgangsimpedanz

$$Z_A \approx 100 \Omega$$

Realer Operationsverstärker

Eingangs-Offsetspannung **Input Offset Voltage**

$$u_S \leftarrow u_A = 0$$

Ausgangs-Offsetspannung **Output Offset Voltage**

$$u_S = 0 \Rightarrow u_A \quad U_{A0} = AU_{S0}$$

Temperaturabhängigkeit der Offsetspannung

$$\frac{\partial U_{S0}}{\partial T}$$

Gleichtaktfehler

Verstärkung der Gleichtaktspannung

$$u_{GT} = \frac{u_- + u_+}{2} \quad u_A = Au_S + \frac{A}{GTU} u_{GT}$$

Realer Operationsverstärker

Gleichtaktunterdrückung GTU **Common Mode Rejection Ratio CMRR**

$$u_S \leftarrow u_A = 0$$

**Einfluss und Unterdrückung von
Betriebsspannungsschwankungen**

$$\frac{\partial u_A}{\partial u_B} \quad \frac{\partial u_B}{\partial u_A}$$

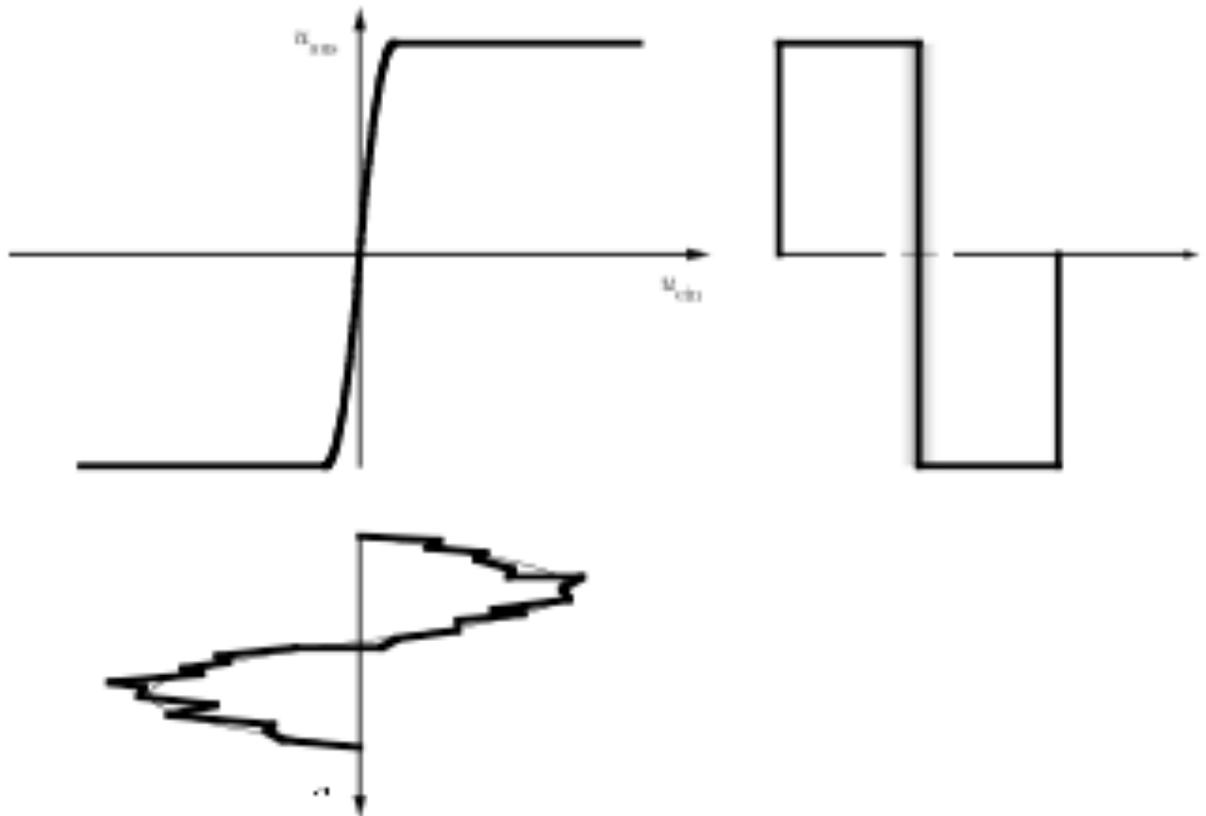
Supply Voltage Rejection Ration

$$\frac{\partial u_B}{\partial u_A}$$

bis 150 dB

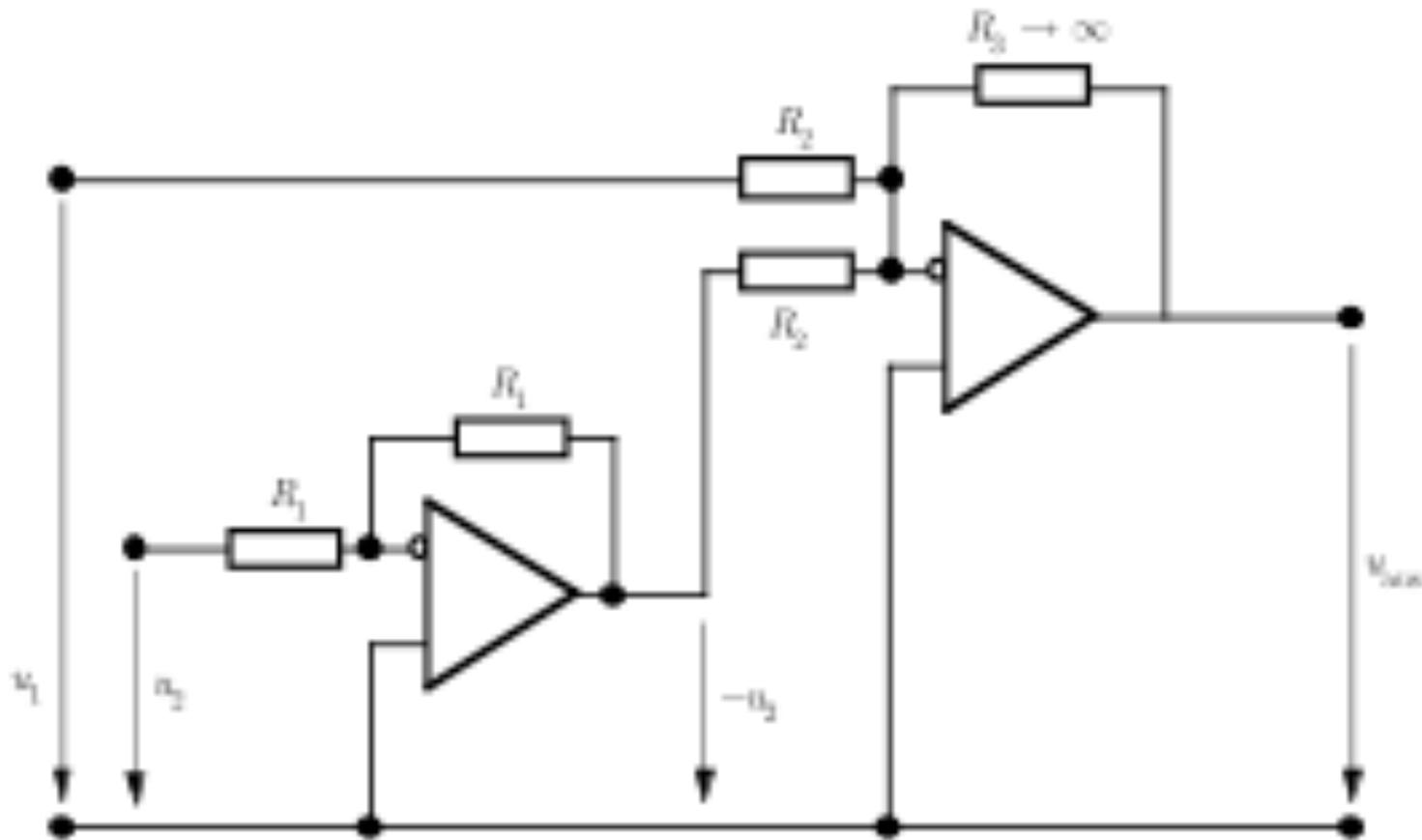
Nichtlineare Verstärker

Rechteck-Impulsformer



Nichtlineare Verstärker

Komparator



Nichtlineare Verstärker

Schmitt-Trigger

