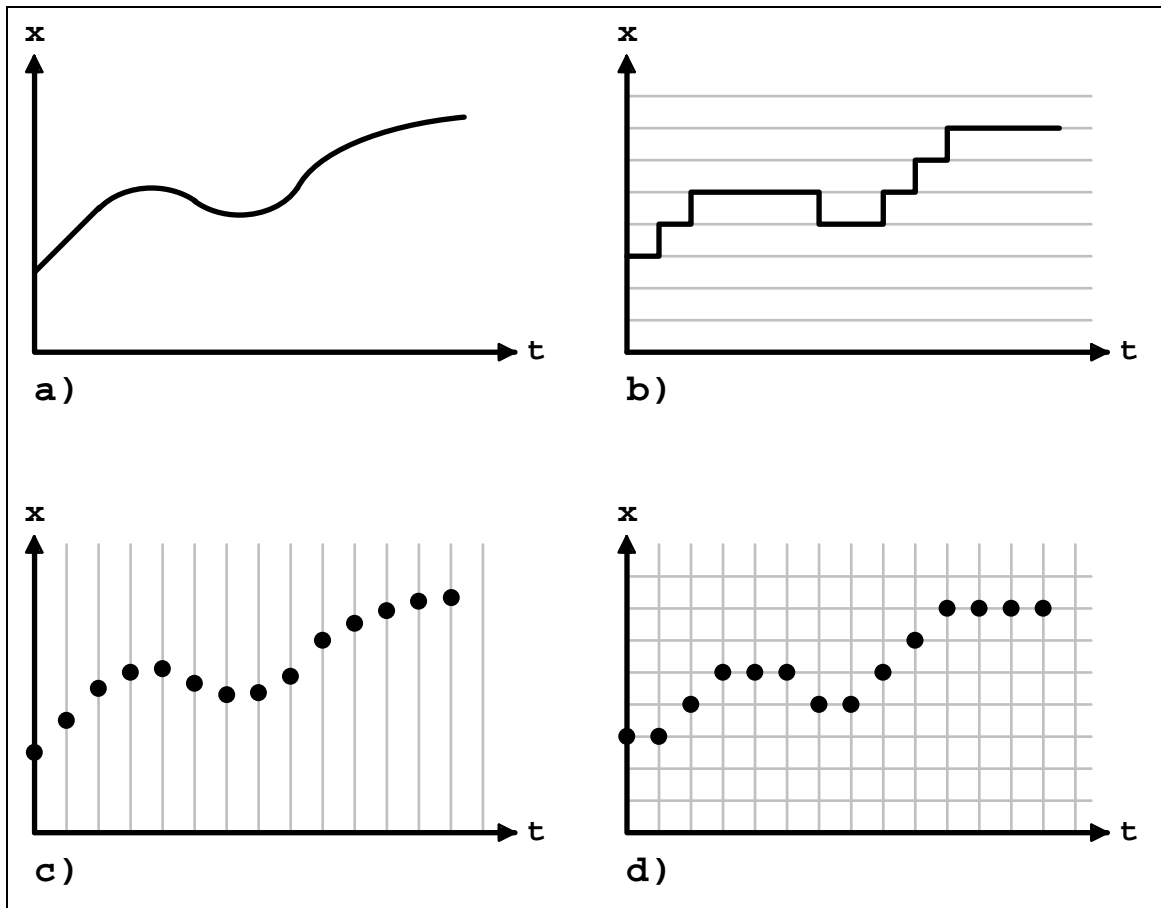


Informationstragende Parameter der Meßsignale



Klassifizierung der Signale:

- a) Amplituden- und zeitkontinuierliches Signal
- b) Amplitudendiskretes und zeitkontinuierliches Signal
- c) Amplitudenkontinuierliches und zeitdiskretes Signal
- d) Amplituden- und zeitdiskretes Signal

Meßsignal

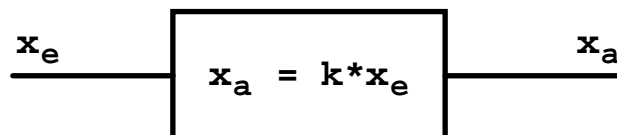
Signale:

- Träger von Nachrichten

Signalstruktur:

- analoge Signale: jeder beliebige Zwischenwert ist möglich
- digitale Signale: Abbildung des übertragenen Wertes als Vielfaches einer Quantisierungseinheit.

Meßumformer:



Meßwertumformer:

- x_e, x_a : physikalisch gleichartige Größen;
z.B.:

Wandler, Spannungsteiler, Dämpfungsglieder,

Spannungsverstärker, Stromverstärker

Meßsignal

Meßgrößenumformer:

- x_e, x_a : physikalisch verschiedenartige Größen;

z.B.:

Aufnehmer (Meßfühler): $x_e = T, x_a = U$

Übertragungsleitwertverstärker:

$$x_e = U, x_a = I:$$

$$x_a/x_e = \underline{\text{Übertragungsleitwert}}$$

$$x_e = I, x_a = U:$$

$$x_a/x_e = \underline{\text{Übertragungswiderstand}}$$

Meßumsetzer:

- x_e, x_a : verschiedenartige Signalstruktur;

z.B.:

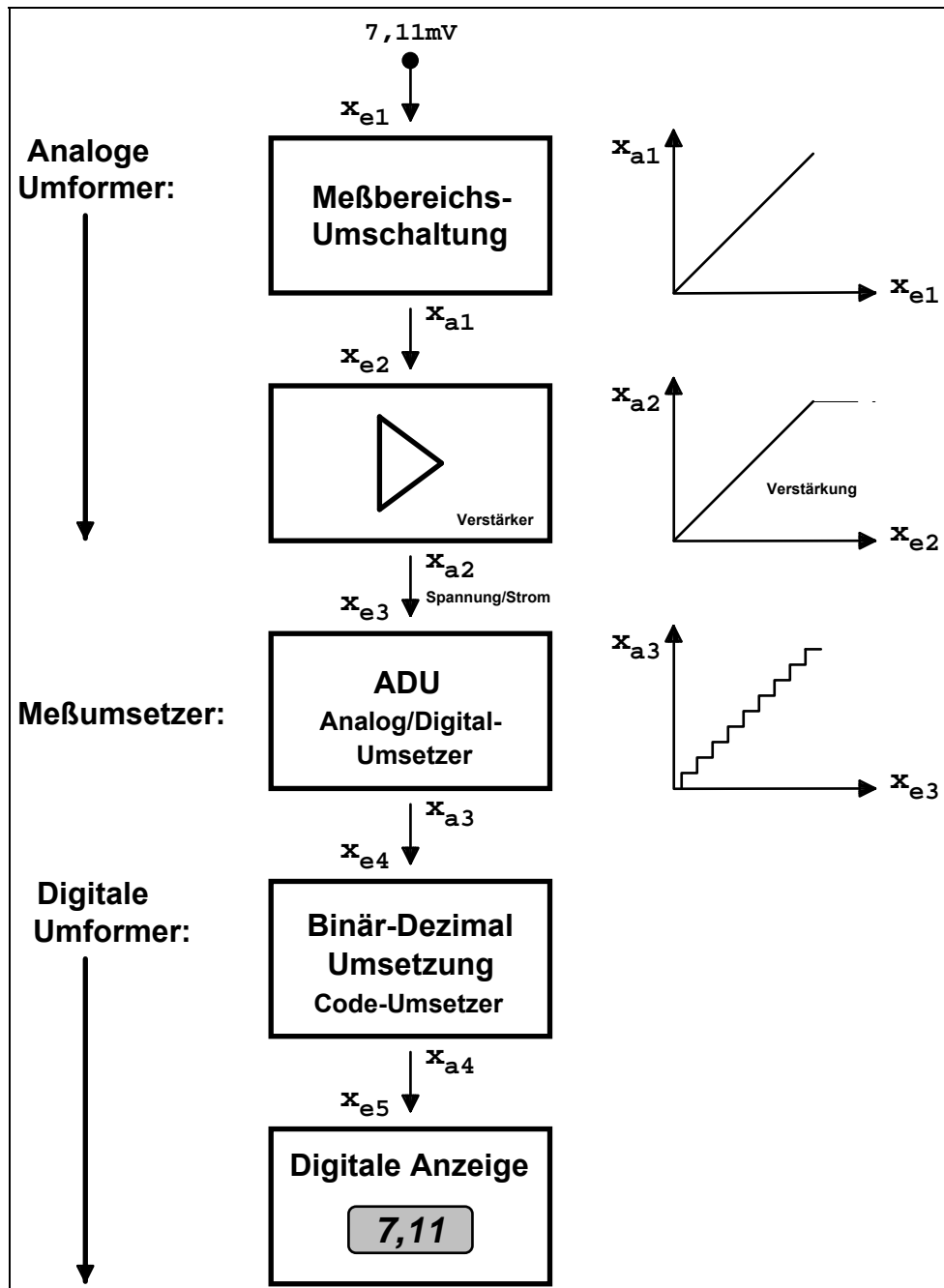
Analog-Digital-Umsetzer (ADU)

Digital-Analog-Umsetzer (DAU)

Meßkette

Beispiel:

- Digitalvoltmeter (DVM) als Meßeinrichtung:



Meßverstärker (MV)

→ Meßwertumformer

Aufgabe des Meßverstärkers:

- Umformung der Meßgrößen in Signale höherer Leistung.

Anforderungen an einen Meßverstärker:

- geringe Rückwirkung auf die Meßgröße;
- hohes Auflösungsvermögen;
- definiertes Übertragungsverhalten;
- gutes dynamisches Verhalten;
- eingprägtes Ausgangssignal.

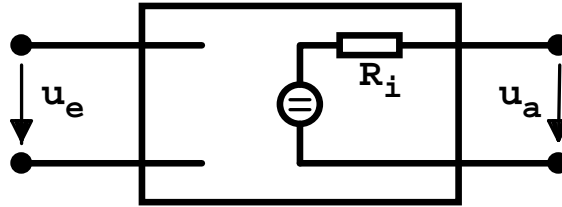
Ersatzschaltbild:

- Der Verstärker wird als ein von der Meßgröße gesteuerter Generator betrachtet. Die Steuerung erfolgt im Idealfall leistungslos.

Verstärkertypen

- **u/u-Verstärker:**

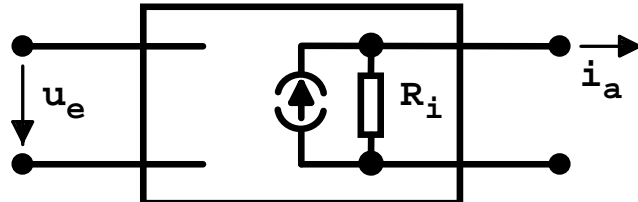
$$E = k_u = \frac{u_a}{u_e}$$



Empfindlichkeit E, Übertragungsfaktor k_u

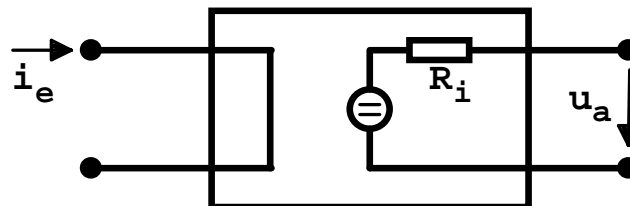
- **u/i-Verstärker:**

$$k_G = \frac{i_a}{u_e} \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{V} \end{bmatrix}$$



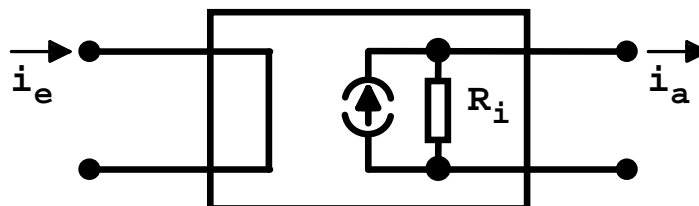
- **i/u-Verstärker:**

$$k_R = \frac{u_a}{i_e} \begin{bmatrix} \mathbf{V} \\ \mathbf{A} \end{bmatrix}$$



- **i/i-Verstärker:**

$$k_i = \frac{i_a}{i_e}$$



Operationsverstärker

Ursprüngliche Anwendung:

- Analogrechner

→ **Bezeichnungen:**

- **Operationsverstärker**
- **Rechenverstärker**
- **Funktionsverstärker**

→ **Mathematische Rechenoperationen:**

- **Addieren**
- **Subtrahieren**
- **Multiplizieren**

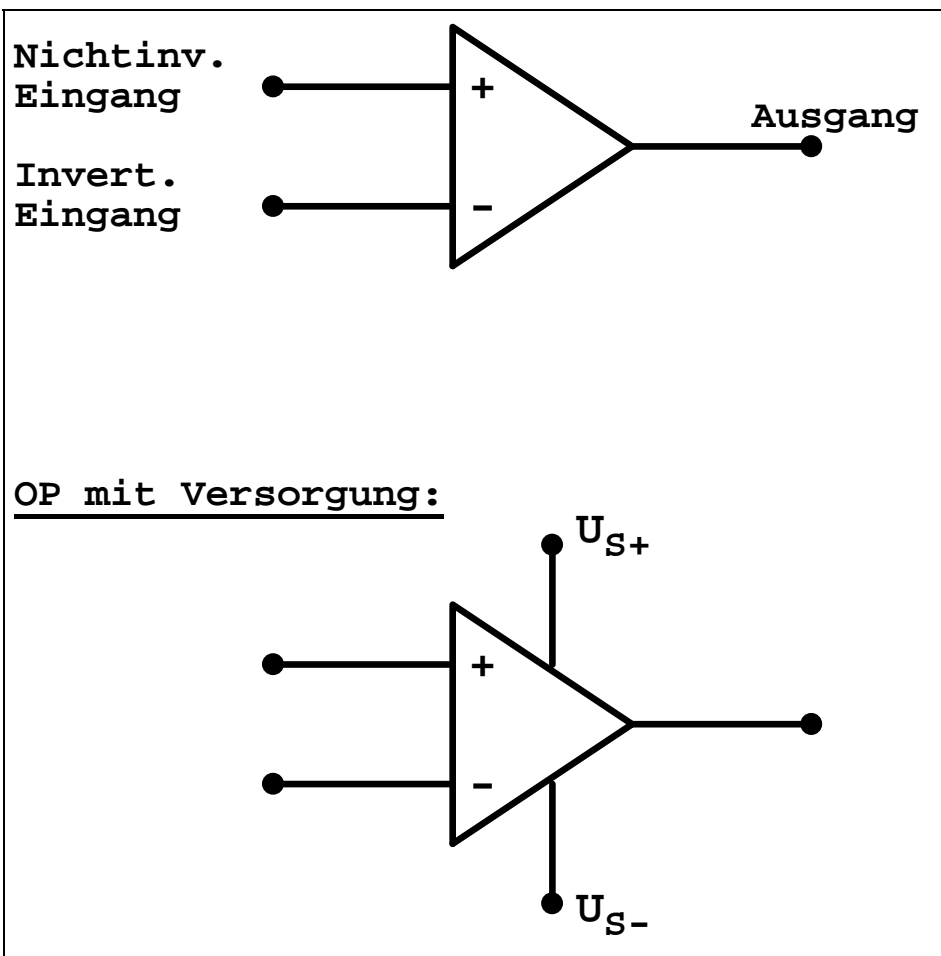
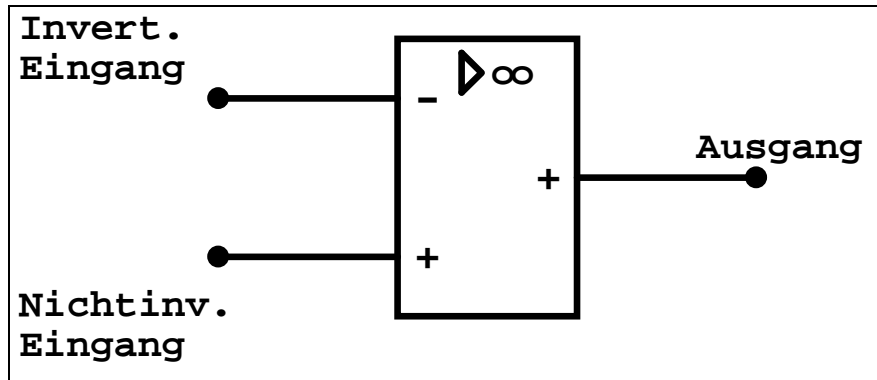
Heute: erweiterter Anwendungsbereich:

- **Meßtechnik**
- **Regelungstechnik**
- **Steuerungstechnik**
- **Nachrichtentechnik**

Allgemeiner Anwendungsbereich:

- **Analoge Signalverarbeitung**

Operationsverstärker Schaltungsaufbau



Operationsverstärker Schaltungsaufbau

Ein Operationsverstärker besteht intern aus drei Teilen:

- **Eingangsstufe**
- **Spannungsverstärkerstufe**
- **Endstufe**

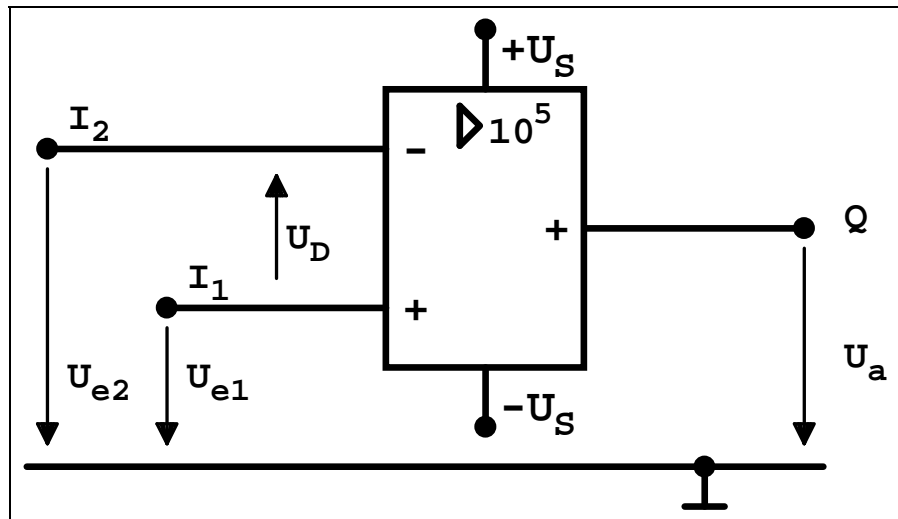


Idealer und realer Operationsverstärker

Eigenschaft	Idealer Verstärker	Realer Verstärker (*)
Spannungsverstärkung	∞	100.000 (100dB)
Eingangswiderstand	∞	2 M Ω
Ausgangswiderstand	0	75 Ω
Gleichtaktunterdrückung	∞	30.000 (90dB)
Max. Signalfrequenz	∞	1 MHz

* Daten des OP-Typ LM741

Leerlauf-Spannungsverstärkung V_0



$$V_0 = \frac{U_a}{U_D} \quad \text{mit} \quad U_D = U_{e1} - U_{e2}$$

oder

$$V_0 = 20 \cdot \log\left(\frac{U_a}{U_D}\right) \quad \text{in dB}$$

$V_0 = V_D =$ Differenzverstärkung

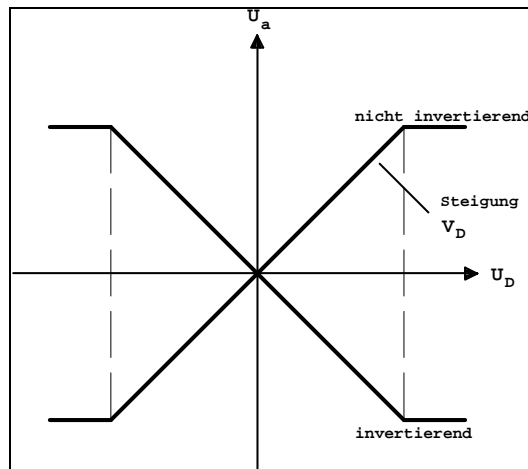
$$V_0 = 10^5 = 20 \cdot \log 10^5 \text{ dB}$$

$$V_0 = 100 \text{ dB}$$

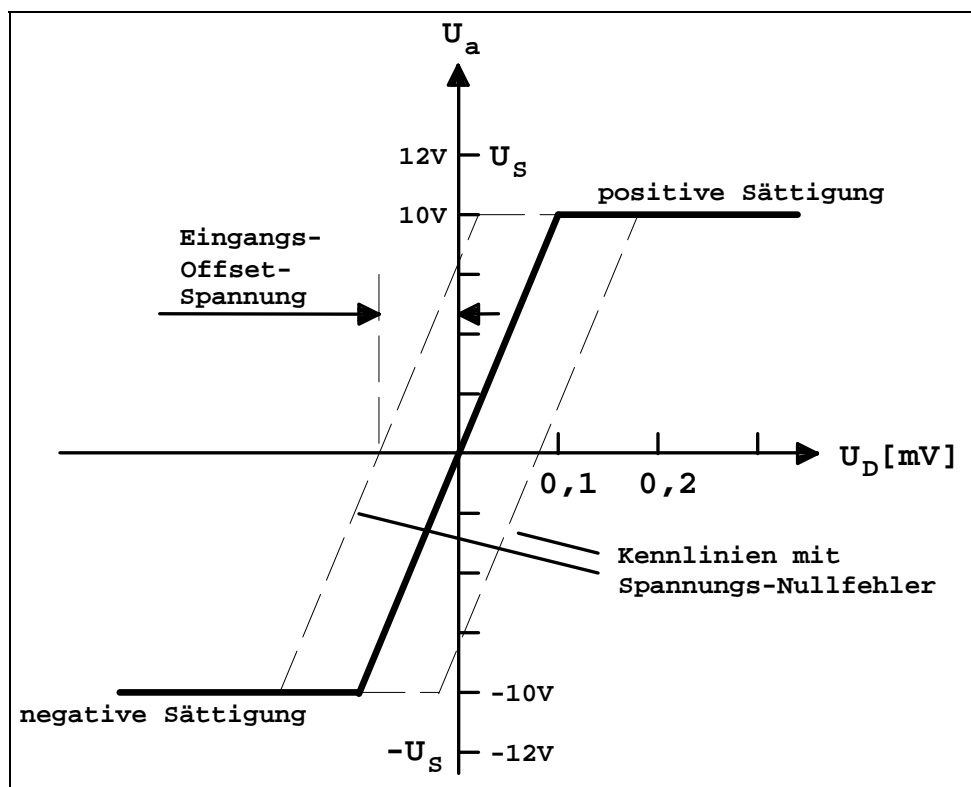
also:

$$U_a = V_0 \cdot (U_{e1} - U_{e2})$$

Differenzverstärker

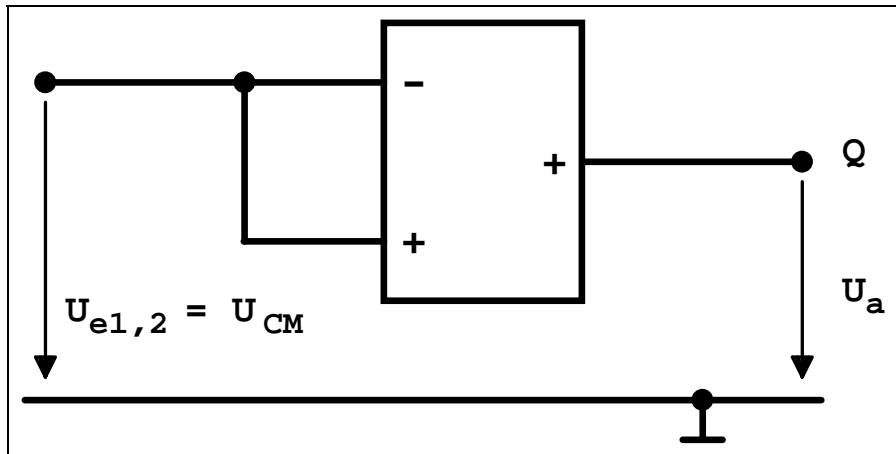


Übertragungskennlinie



$$U_a = f(U_D)$$

Gleichtaktaussteuerung Gleichtakt-Spannungsverstärkung V_{CM}



$$V_{CM} = \frac{U_a}{U_{CM}}$$

CM: "common mode"

U_{CM} : Eingangs-Gleichtaktspannung

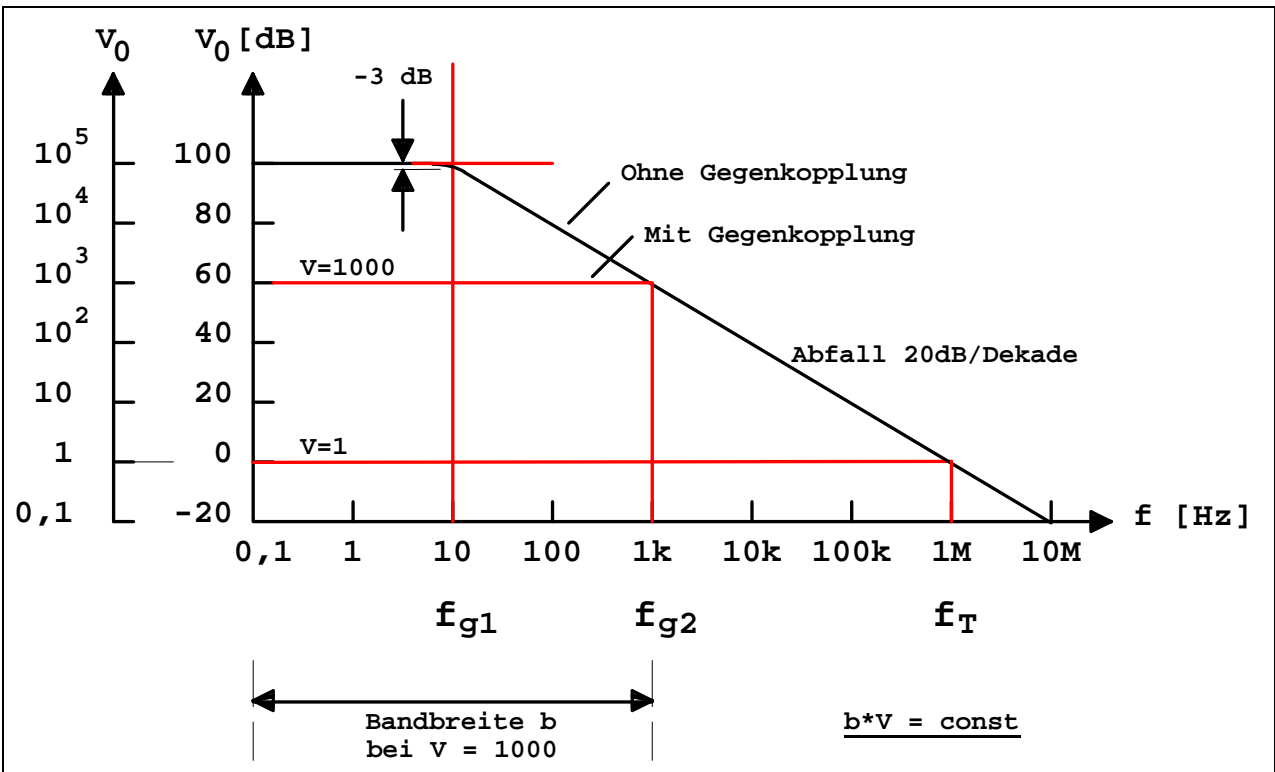
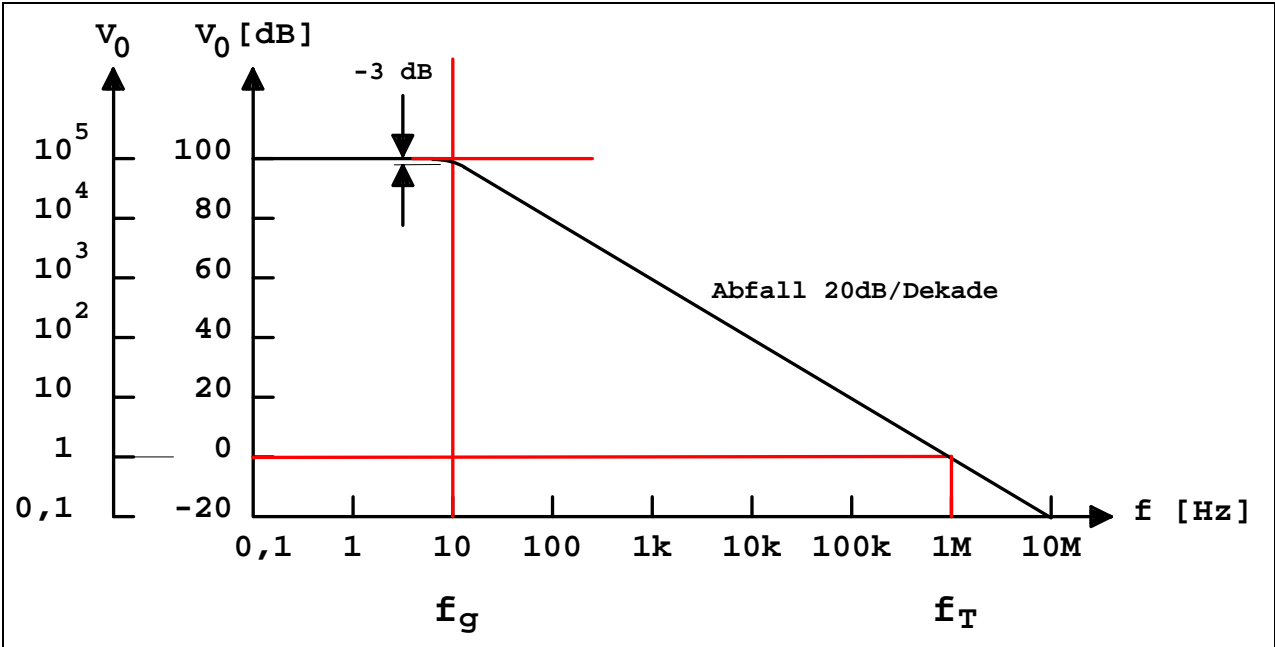
Gleichtaktunterdrückung G CMRR (*common mode rejection ratio*)

$$G = \frac{V_0}{V_{CM}} \quad \text{oder} \quad G = 20 \cdot \log\left(\frac{V_0}{V_{CM}}\right) \quad \text{in dB}$$

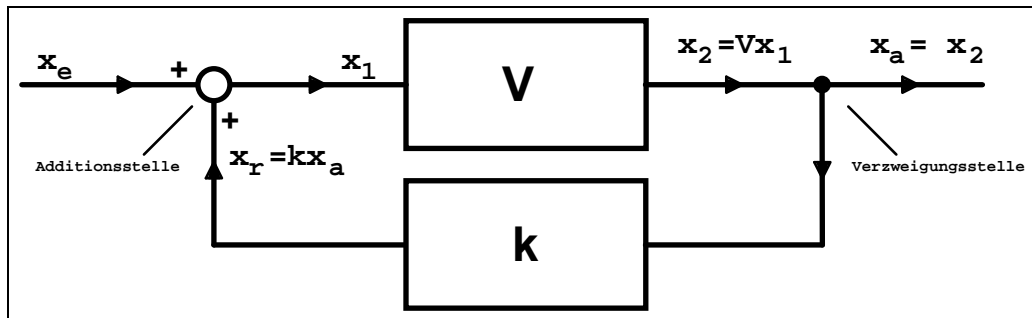
mit: V_0 = Verstärkung im Differenzbetrieb
 V_{CM} = Verstärkung im Gleichtaktbetrieb
 = 0 im Idealfall.

typisch: $CMRR = G \geq 80 \text{ dB}$ (für $\omega \rightarrow 0$)

Frequenzgang des OP LM714



Elementare Gegenkopplungsschaltungen



$$x_e = x_1 - x_r = x_1(1 - kV)$$

kV = Schleifenverstärkung

$$x_a = x_1 \cdot V$$

damit:

$$\frac{x_a}{x_e} = V' = \frac{V}{1 - kV}$$

$1 - kV$ = Gegenkopplungsgrad

Idealfall:

$$\lim_{V \rightarrow \infty} \frac{V}{1 - kV} = \lim_{V \rightarrow \infty} \frac{1}{\frac{1}{V} - k} = -\frac{1}{k}$$

Dieser Idealfall lässt sich statisch ($\omega \rightarrow 0$) in guter Näherung mit Operationsverstärkern realisieren.

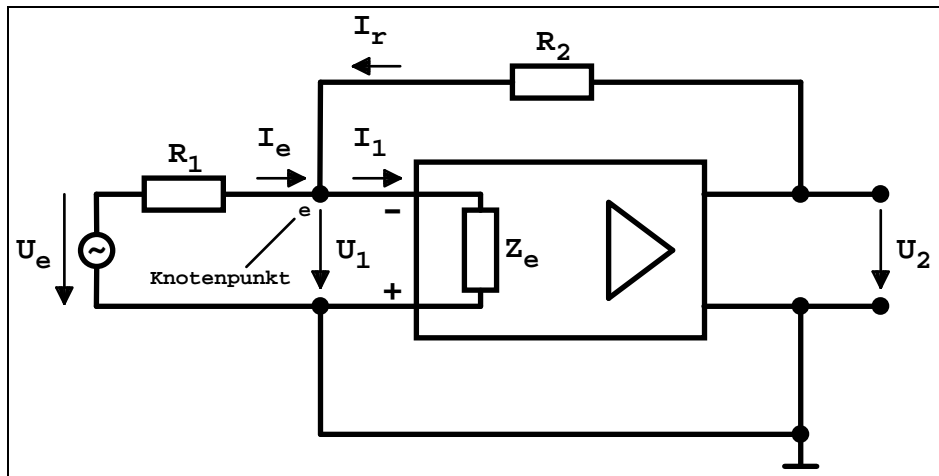
Abweichung ε gegenüber dem Idealfall:

$$\varepsilon = \frac{\frac{V}{1 - kV} - \frac{-1}{k}}{-\frac{1}{k}}$$

also:

$$\varepsilon = \frac{-1}{1 - kV}$$

Spannungs-Parallel-Gegenkopplung



$$I_e + I_R + I_1 = 0 \quad \text{(Knotenpunkt "e")}$$

$$I_e = \frac{U_1}{Z_e} - \frac{U_2 - U_1}{R_2} \quad ; \quad U_1 = \frac{U_2}{V_U}$$

$$I_e = U_2 \left(\frac{1}{V_U \cdot Z_e} + \frac{1}{V_U \cdot R_2} - \frac{1}{R_2} \right); \quad U_2 = U_a$$

$$V' = \frac{U_a}{I_e} = \frac{1}{\frac{1}{V_U \cdot Z_e} + \frac{1}{V_U \cdot R_2} - \frac{1}{R_2}} = \frac{R_2 V_u \frac{Z_e}{R_2 + Z_e}}{1 - V_U \frac{Z_e}{R_2 + Z_e}}$$

Im Idealfall ergibt sich damit:

$$\lim_{V_U \rightarrow \infty} \frac{U_a}{I_e} = -R_2$$

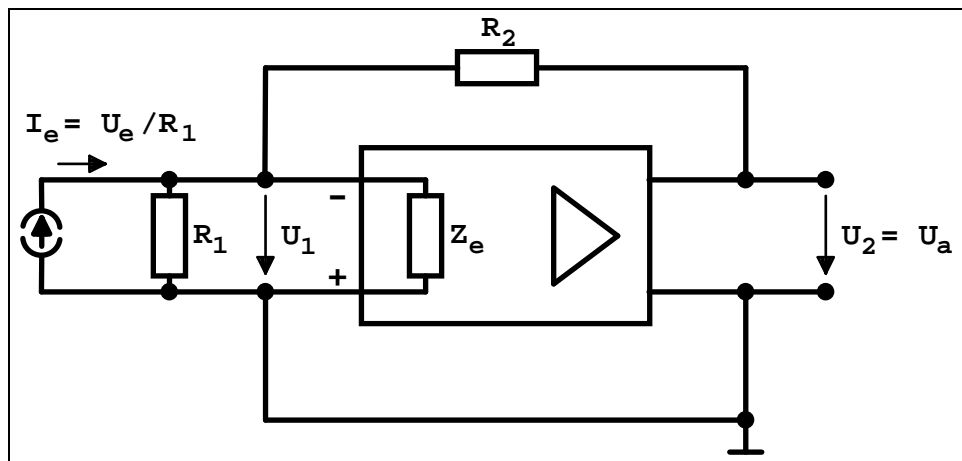
(Übertragungswiderstand)

Bei Stromsteuerung ($x_e = I_e =$ Eingangsgröße) arbeitet der Verstärker als Meßgrößenumformer.

Spannungs-Parallel-Gegenkopplung

U_e als Eingangsgröße:

Zur Berechnung von U_a/U_e ist es zweckmäßig, die Signalquelle umzuformen:



Mit
ergibt sich

$$Z_1^* = R_1 \parallel Z_e$$

$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{U_a \cdot \underbrace{I_e}_{\substack{V' \\ 1/R_1}}}{U_e} = \frac{V'}{U_e} = \frac{\frac{R_2}{R_1} V_u \frac{Z_1^*}{R_2 + Z_1^*}}{1 - V_u \frac{Z_1^*}{R_2 + Z_1^*}}$$

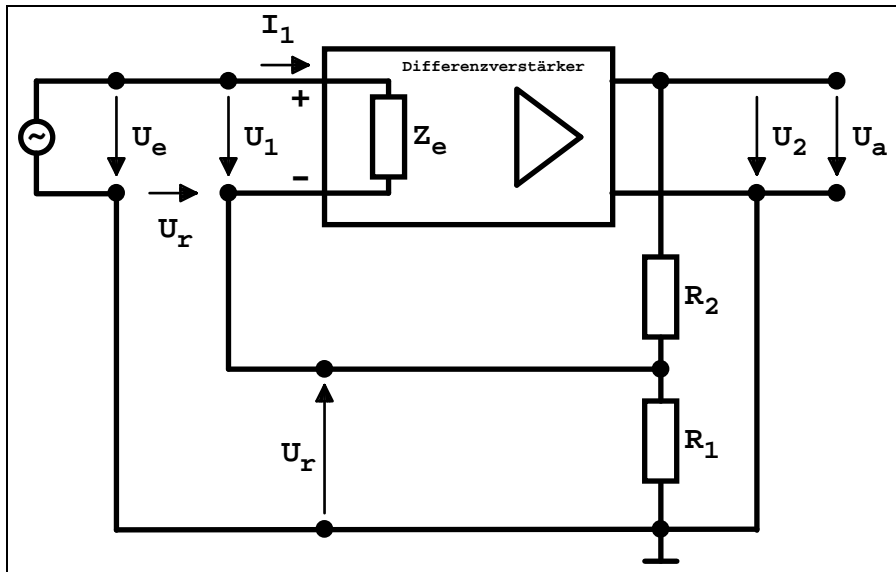
Für $R_1 \ll Z_e$ wird $Z_1^* = R_1$.

Im Idealfall ergibt sich damit:

$$\lim_{V_u \rightarrow \infty} \frac{U_a}{U_e} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Bei Spannungssteuerung ($x_e = U_e =$ Eingangsgröße) arbeitet der Verstärker als Meßwertumformer.

Spannungs-Serien-Gegenkopplung



$$U_R = -\frac{R_1}{R_1 + R_2} U_a \quad \text{für } Z_e \gg (R_1 \parallel R_2)$$

$$U_e + U_r - U_1 = 0 \quad \text{(Eingangsmasche)}$$

$$U_e = \frac{U_a}{V_U} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_a$$

$$V' = \frac{U_a}{U_e} = \frac{1}{\frac{1}{V_U} + \frac{R_1}{R_1 + R_2}} = \frac{V_u}{1 - V_U \frac{R_1}{R_1 + R_2}}$$

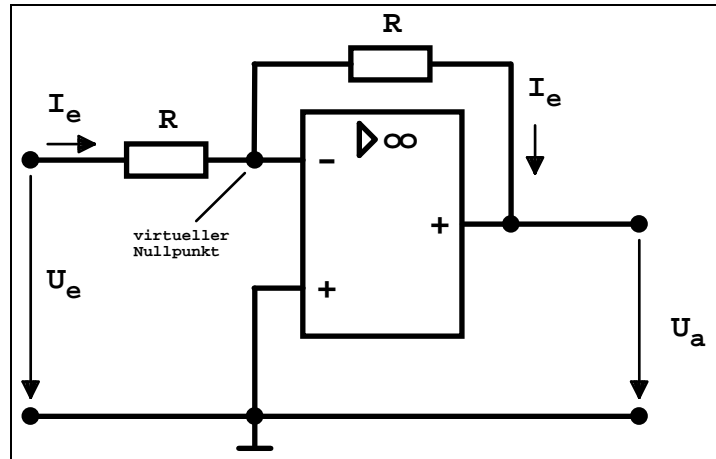
Im Idealfall ergibt sich damit:

$$\lim_{V_U \rightarrow \infty} \frac{U_a}{U_e} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

Spannungs-Parallel-Gegenkopplung

Annahme (Idealfall): $V \rightarrow \infty$
 $U_{os} = 0$
 $I_{os} = 0$

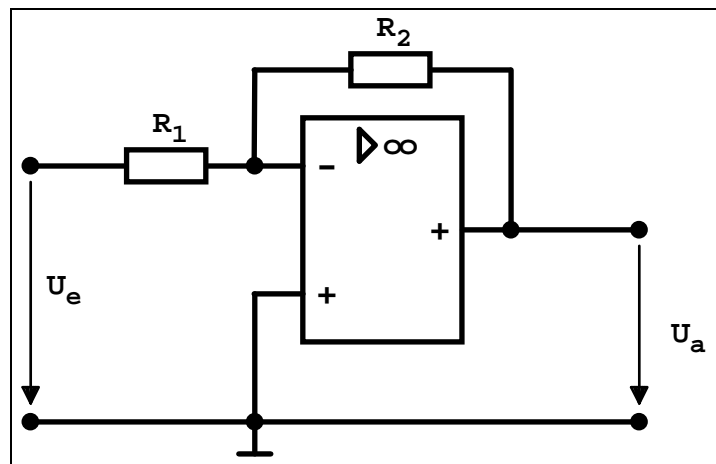
Inverter:



$$I_e = \frac{U_e}{R} = -\frac{U_a}{R}$$

$$\frac{U_a}{U_e} = -1$$

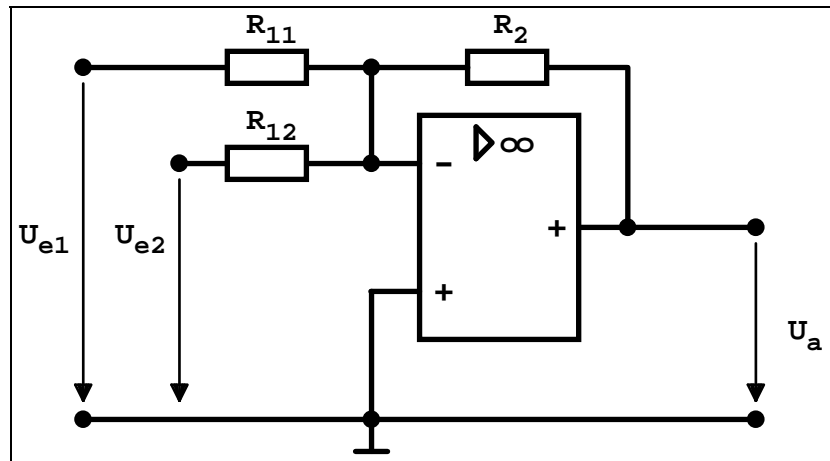
Umkehrverstärker:



$$\frac{U_a}{U_e} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Spannungs-Parallel-Gegenkopplung

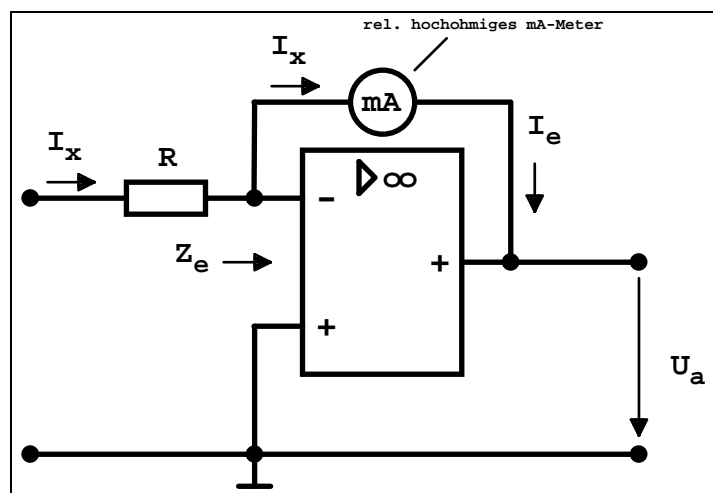
Invertierender Summierverstärker:



Superposition ergibt:

$$U_a = U_{e1} \cdot \frac{-R_2}{R_{11}} + U_{e2} \cdot \frac{-R_2}{R_{12}}$$

Ideales mA-Meter:

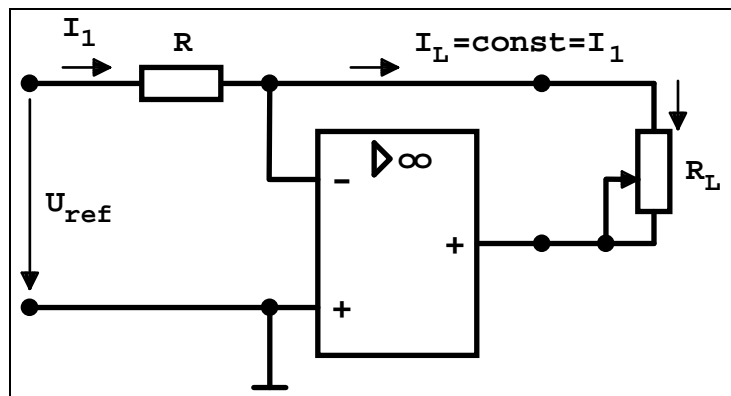


$$Z_e = \frac{U_e}{I_x}; \quad U_e = \frac{U_a}{V}; \quad \lim_{V \rightarrow \infty} U_e = 0$$

also: $Z_e \rightarrow 0$ für $V \rightarrow \infty$

Spannungs-Parallel-Gegenkopplung

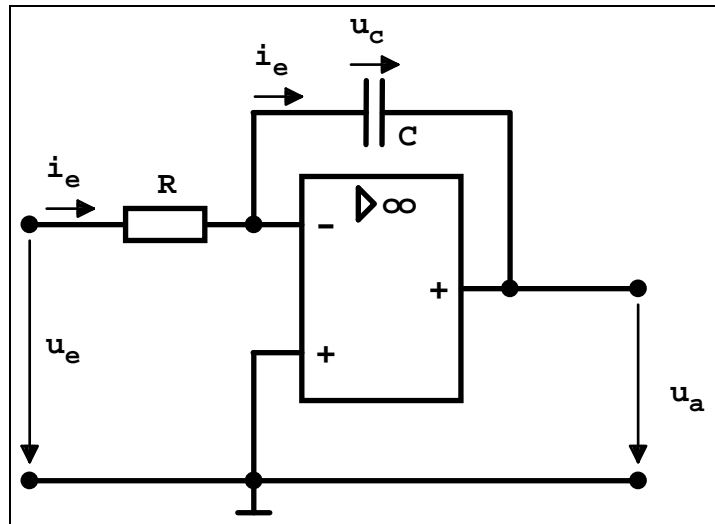
Stromquelle:



$$I_L = \frac{U_{ref}}{R} = const$$

Spannungs-Parallel-Gegenkopplung

Invertierender Integrator:



$$i_c = \frac{dQ}{dt} = C \cdot \frac{du_c}{dt} \quad (Q = C \cdot u)$$

$$i_e = \frac{u_e}{R} = i_c, \quad \frac{u_e}{R} = C \cdot \frac{du_c}{dt}$$

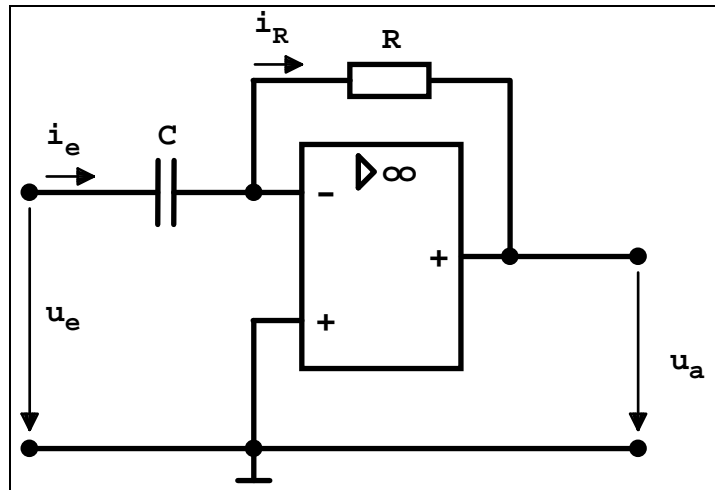
$$u_a = -u_c = -\frac{1}{RC} \int u_e dt + u_a(t=0)$$

Typische Anwendungen des Integrators:

- **Meßtechnik:**
 - z.B. Linear sich mit der Zeit ändernde Spannung (*ramp*), (Sägezahn- oder Dreiecksgeneratoren).
- **Regelungstechnik:**
 - z.B. I-Anteil bei PID-Regelung.

Spannungs-Parallel-Gegenkopplung

Differenzierender Verstärker (Differenzierer):



$$i_e = C \cdot \frac{du_e}{dt} \quad \text{mit } i_e = i_R$$

$$u_a = -RC \cdot \frac{dU_e}{dt}$$

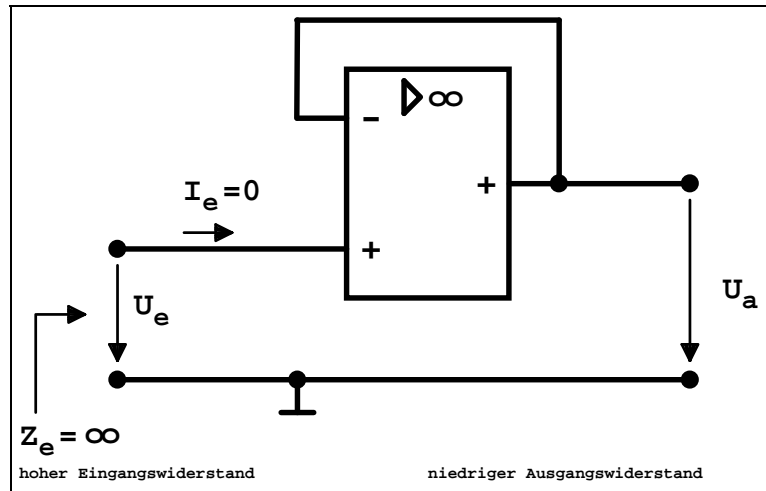
$$u_a = -T_D \cdot \frac{dU_e}{dt} \quad \text{mit } T_D = RC$$

Typische Anwendungen des Differenzierers:

- **Meßtechnik:**
 - z.B. Beschleunigungsmessungen (Bestimmung der Änderung eines Eingangssignals).
- **Regelungstechnik:**
 - z.B. D-Anteil bei PD- oder PID-Regelung.
- **Nachrichtentechnik:**
 - z.B. Grundschialtung für Frequenzfilter mit Hochpaßverhalten.

Spannungs-Serien-Gegenkopplung

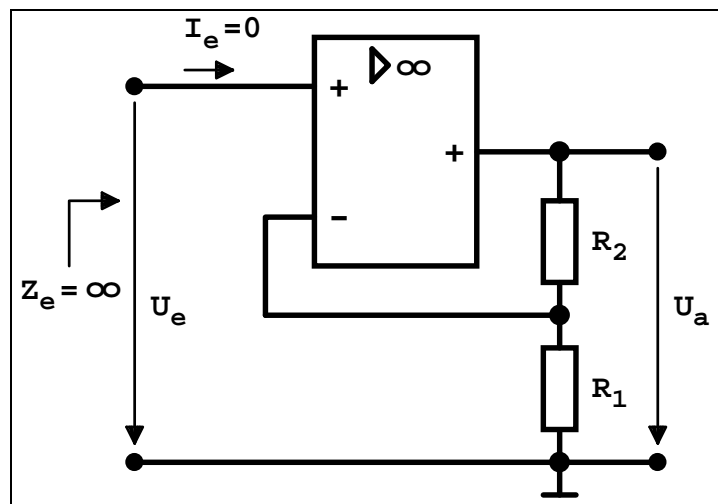
Trennverstärker (Impedanzwandler):



$$U_a = U_e$$

(100% Gegenkopplung)

Nichtinvertierender Verstärker:

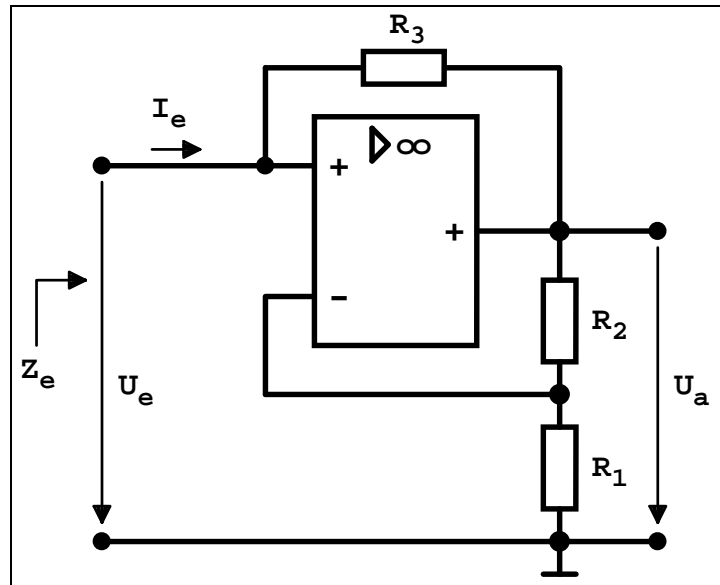


$$U_e = U_a \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

Spannungs-Serien-Gegenkopplung

Negativer Widerstand (INIK):

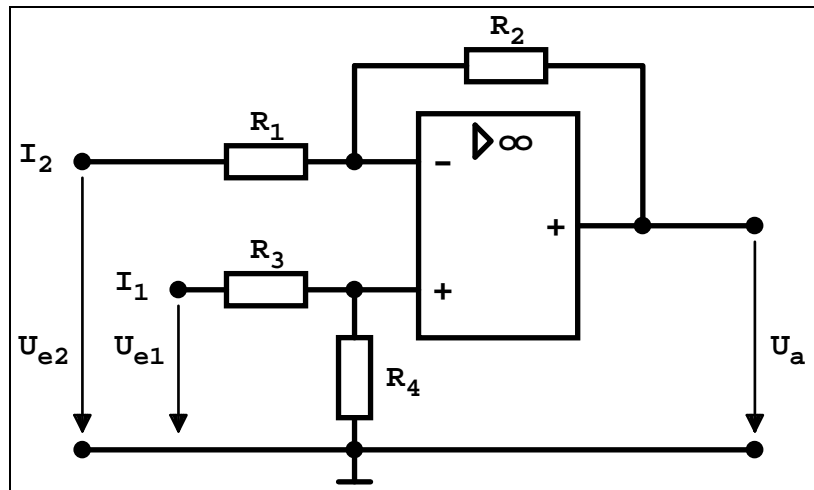


$$I_e = \frac{U_e - U_a}{R_3} = \frac{U_e}{R_3} \cdot \left(1 - \frac{U_a}{U_e}\right)$$

$$Z_e = \frac{U_e}{I_e} = -R_3 \quad \text{für } R_1 = R_2$$

Differenzverstärker (Subtrahierer)

Der Differenzverstärker bildet die Differenz von zwei angelegten Eingangsspannungen:



$$U_a = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot U_{e1} - \frac{R_2}{R_1} \cdot U_{e2}$$

Vereinfachungen:

a)

$$R_1 = R_3, \quad R_2 = R_4, \quad \rightarrow \quad \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3} = V$$

damit

$$U_a = V \cdot (U_{e1} - U_{e2})$$

b)

$$R_1 = R_3 = R_2 = R_4, \quad \rightarrow V = 1$$

damit

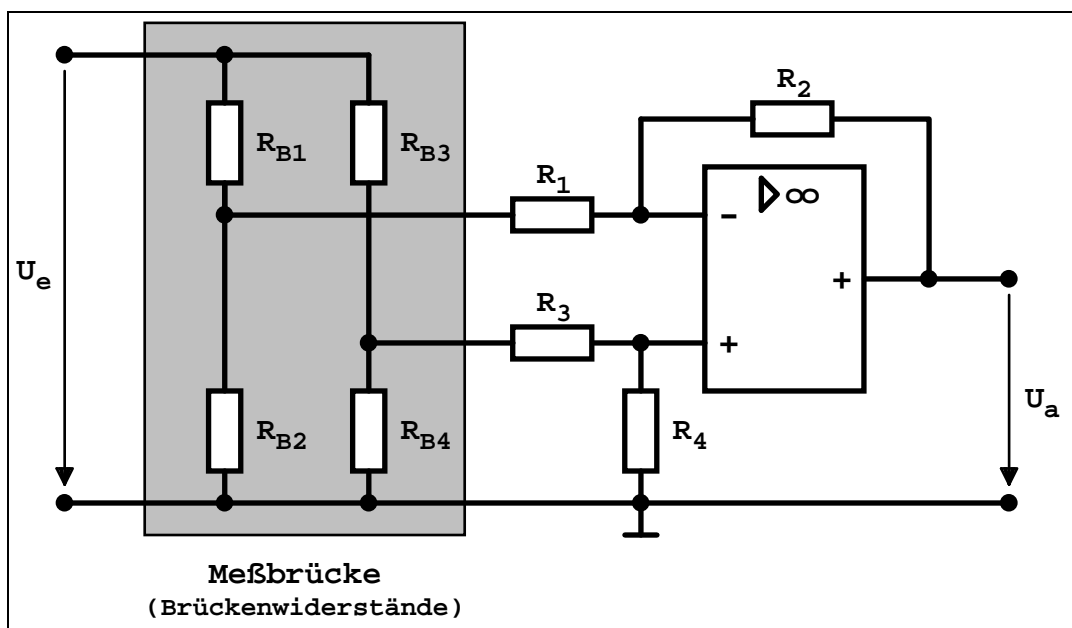
$$U_a = U_{e1} - U_{e2}$$

Hinweis: Der Differenzverstärker rechnet vorzeichenrichtig!

Brückenverstärker

Typische Anwendung des Differenzverstärkers:

- **Brückenverstärker zur Verstärkung und zum Abgleich der Diagonalspannung in Brückenschaltungen (z.B. Wheatstonesche Brücke)**



Einsatzgebiete:

- **Meß-, Steuer- und Regeltechnik.**

Brückenwiderstände:

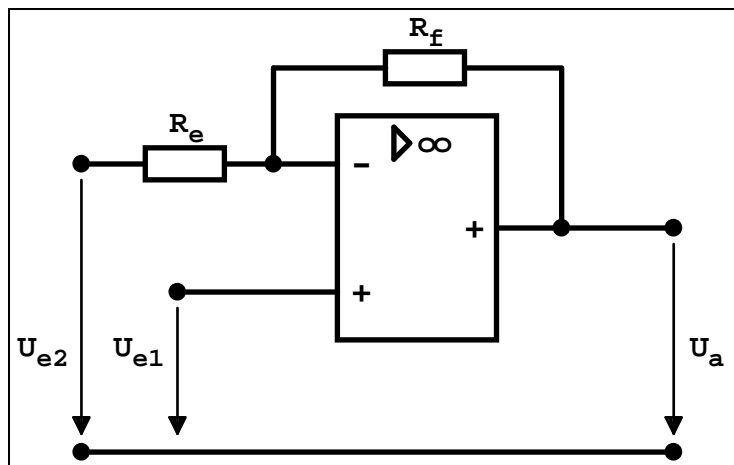
- **Ohmsche Widerstände,**
- **Temperaturabhängige Widerstände (NTC, PTC),**
- **Lichtempfindliche Bauelemente (Fotowiderstände).**

Symmetrischer Subtrahierer

mit hohen Eingangswiderständen (Instrumentationsverstärker)

Der Instrumentationsverstärker nutzt den hochohmigen Eingang von Operationsverstärkern und die Eigenschaft als Differenzverstärker:

⇒ fast idealer Meßverstärker



Prinzip der Überlagerung (Superposition)

Unter der Annahme

$$U_{e2} = 0$$

ergibt sich:

$$U_{a1} = \left(1 + \frac{R_f}{R_e}\right) \cdot U_{e1}$$

Ebenso ergibt sich aus:

$$U_{e1} = 0$$

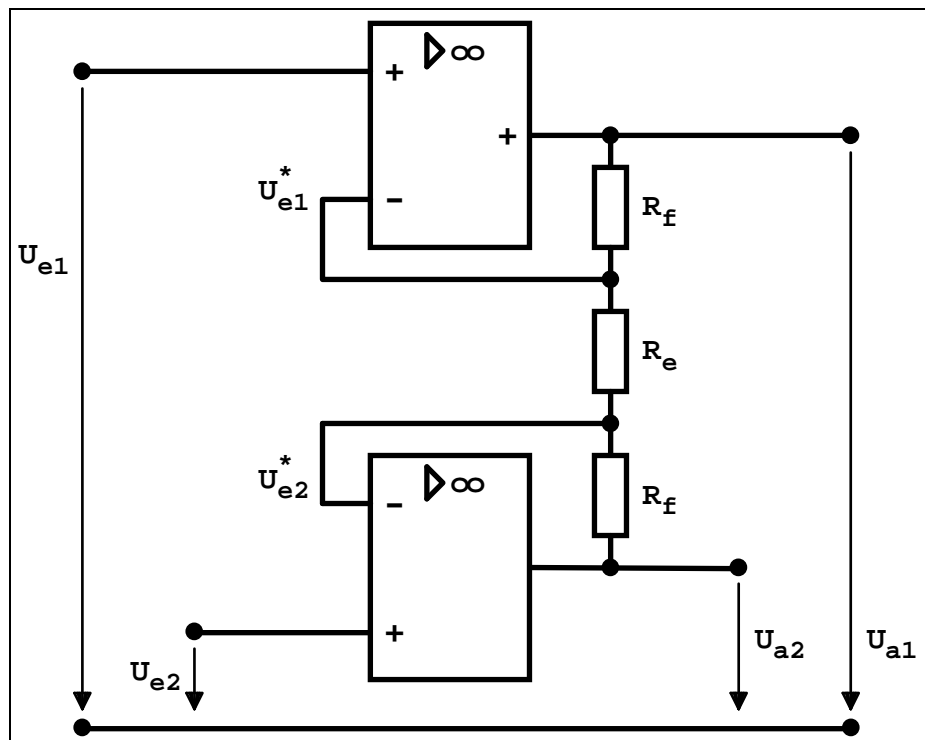
$$U_{a2} = -\frac{R_f}{R_e} \cdot U_{e2}$$

Die Schaltung stellt eine Kombination aus invertierendem und nicht invertierendem Verstärker dar. Für U_a ergibt sich damit:

$$U_a = (1 + V_B) \cdot U_{e1} - V_B \cdot U_{e2} \quad \text{mit } V_B = \frac{R_f}{R_e}$$

Instrumentierungsverstärker

In identischer Form kann die folgende Schaltung berechnet werden:



In diesem Fall gilt:

$$U_{e1}^* = U_{e1} \quad \text{und} \quad U_{e2}^* = U_{e2}$$

Damit ergibt sich:

$$U_{a1} = (1 + V_B) \cdot U_{e1} - V_B \cdot U_{e2}$$

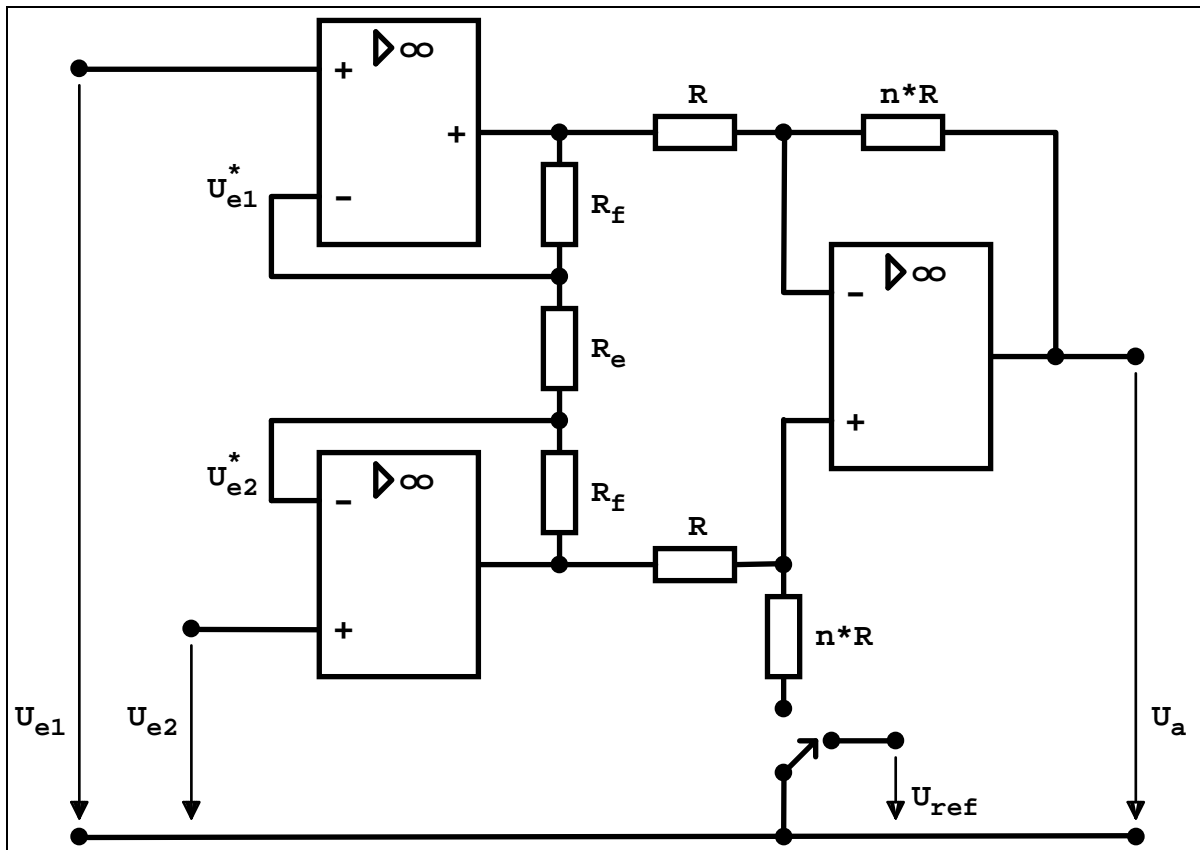
und

$$U_{a2} = (1 + V_B) \cdot U_{e2} - V_B \cdot U_{e1}$$

Instrumentierungsverstärker

(Drei OPV)

Mit dem Subtrahierer kann jetzt die Differenz der beiden Spannungen gebildet werden:



In diesem Fall gilt:

$$U_a = n \cdot (U_{a2} - U_{a1})$$

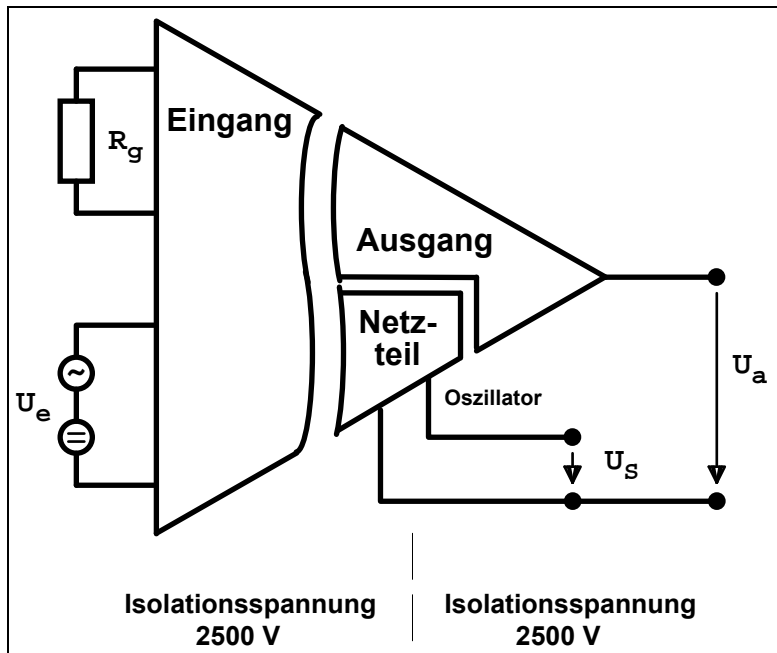
also:

$$U_a = n \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{R_f}{R_e} \right) \cdot (U_{e2} - U_{e1})$$

Unter Berücksichtigung der zusätzlichen Referenzspannung U_{ref} ergibt sich:

$$U_a = n \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{R_f}{R_e} \right) \cdot (U_{e2} - U_{e1}) + U_{ref}$$

Trennverstärker (Isolation Amplifier)



Trennverstärker:

Eingangsteil galvanisch getrennt von Ausgangsteil und Netzteil.

"Two-port" Trennverstärker:

Ausgangsteil und Netzteil sind nicht gegeneinander isoliert.

"Three-port" Trennverstärker:

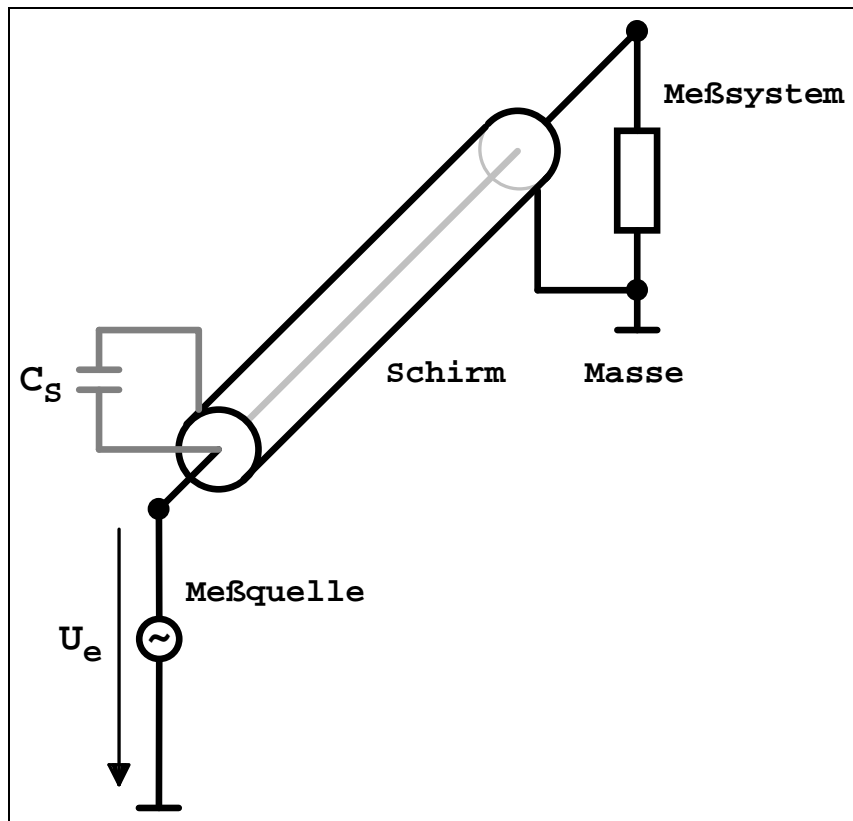
Ausgangsteil und Netzteil sind gegeneinander isoliert.

(Beispiel: Analog Devices AD293/294)

Kopplungsarten:

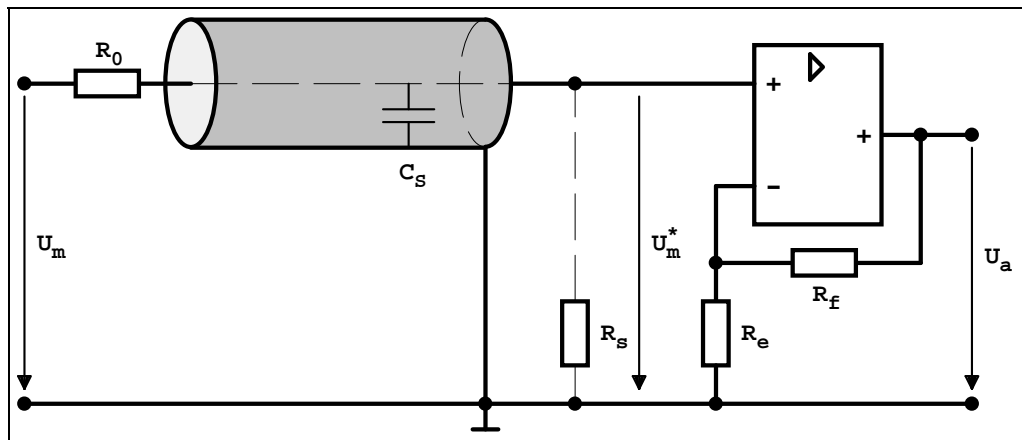
Übertragungskopplung (Transformatorprinzip),
Optoelektronische Kopplung,
Kapazitive Kopplung.

Schirmung und *Guard*-Technik

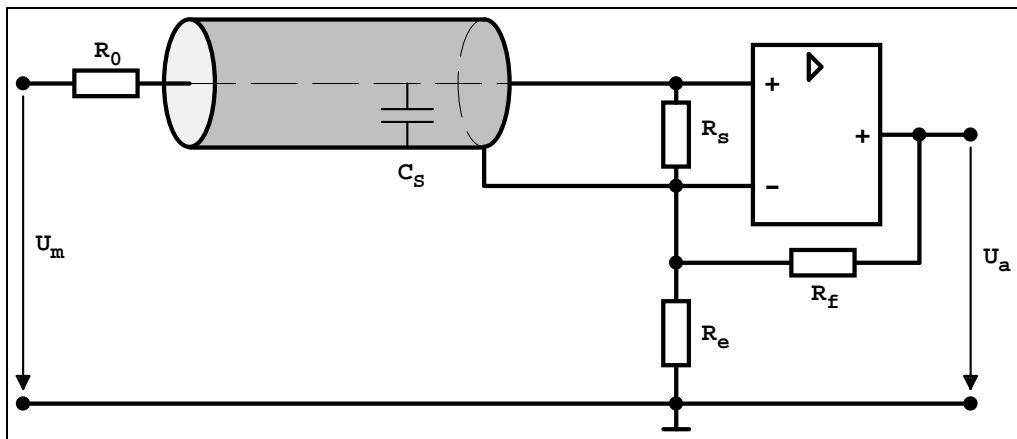


Abschirmungs-Prinzip

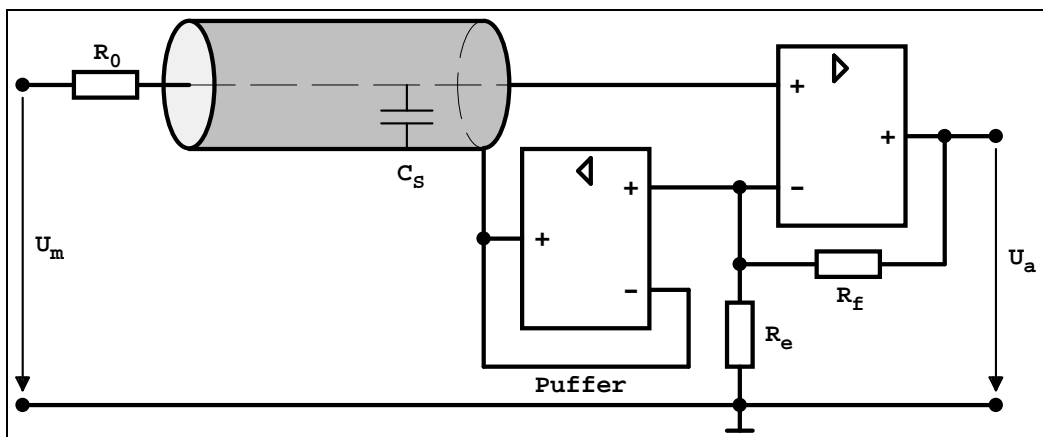
Schirmung und *Guard*-Technik



Standardanschluß eines Verstärkers



Schirm auf Signalpotential



Driven Guard