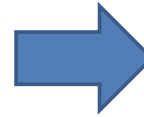


4. Komponenten:

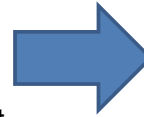
4.1 Messverstärker:

4.1.1 Was ist ein elektrischer Verstärker?

- (Elektrisch) gesteuerte elektrische Quelle
- Linearer und nichtlineare Abhängigkeit (Ausgang/Eingang)
- 4 Kombinationen:
 - Spannungsgesteuerte Spannungsquelle
 - Spannungsgesteuerte Stromquelle
 - Stromgesteuerte Stromquelle
 - Stromgesteuerte Spannungsquelle
- Idealer Verstärker:
 - Keine Rückwirkung von der Last auf Ausgang
 - Keine Rückwirkung von Ausgang auf Eingang
- Verwendung:
 - Pegelanpassung
 - Entlastung von ursprüngliche Signalquelle (Entkopplung von Ausgang und Eingang)
 - Realisierung von mathematischen Operationen mit Signalen
 - Generierung von Signalformen



Linearer Verstärker sind am meisten verbreitet

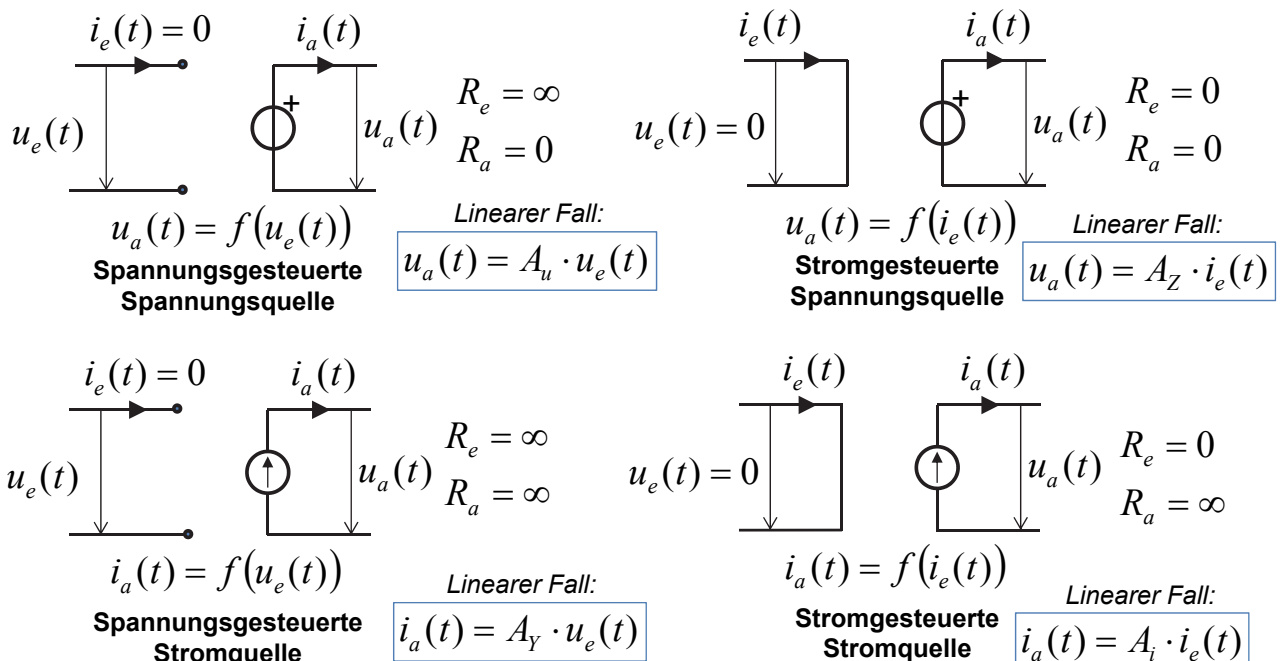


Auch als Ersatz für Kompensationsmethoden!

4. Komponenten:

4.1 Messverstärker:

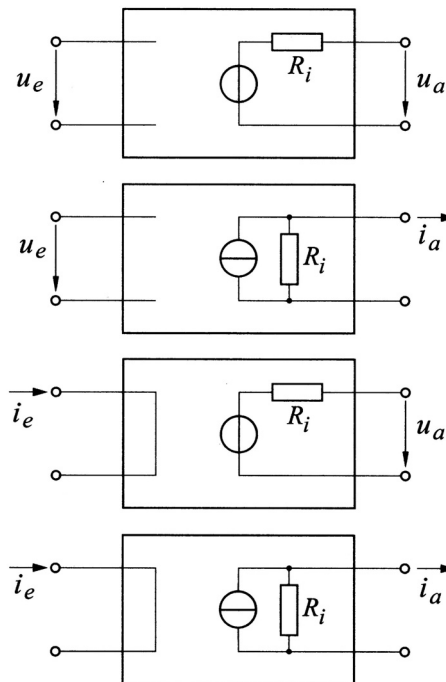
4.1.1 Mathematische Modelle idealer Verstärker



4. Komponenten:

4.1 Messverstärker:

4.1.2 Realer Verstärker (erste Annäherung)

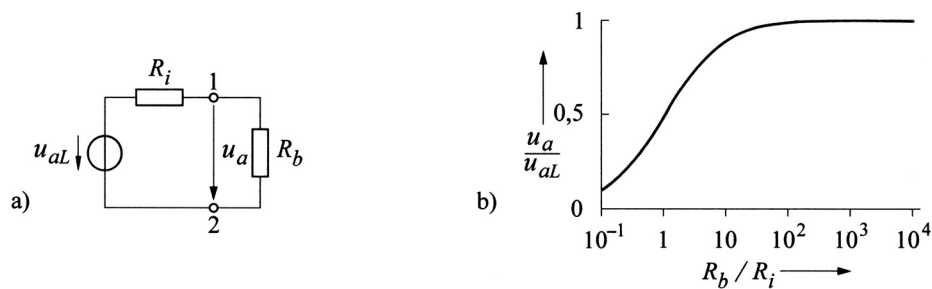


(E. Schröder: Elektrische Messtechnik)

4. Komponenten:

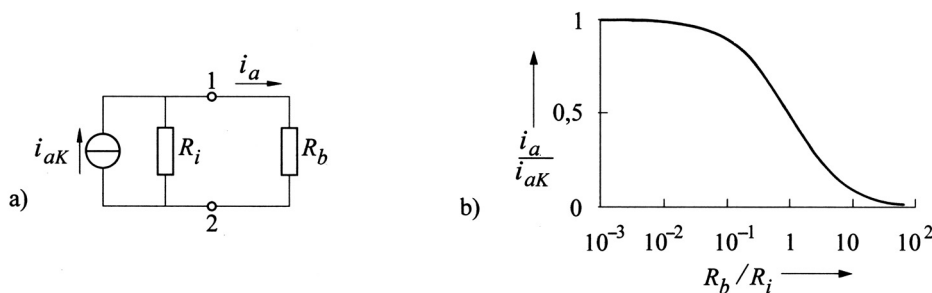
4.1 Messverstärker:

4.1.2 Einfluss von Ausgangswiderstand



Spannungsgenerator: a) Ersatzschaltbild, b) Ausgangsspannung

(E. Schröder: Elektrische Messtechnik)



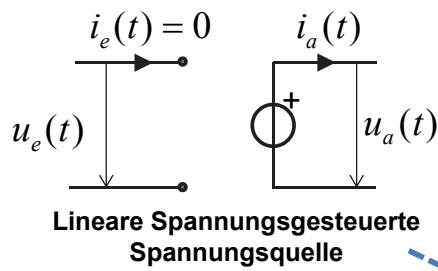
Spannungsgenerator: a) Ersatzschaltbild, b) Ausgangsspannung

(E. Schröder: Elektrische Messtechnik)

4. Komponenten:

4.1 Messverstärker:

4.1.3 Ein Schritt weiter: idealisierter linearer Spannungsverstärker



$$R_e = \infty$$

$$R_a = 0$$

$$u_a(t) = A_u \cdot u_e(t)$$

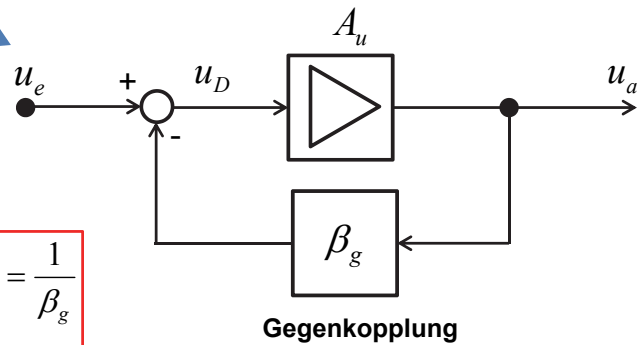
$$A_u \rightarrow \infty$$

$$u_a = u_D \cdot A_u = A_u \cdot (u_e - u_a \cdot \beta_g)$$

$$u_a \cdot (1 + A_u \cdot \beta_g) = A_u \cdot u_e$$

$$u_a = \frac{A_u \cdot u_e}{1 + A_u \cdot \beta_g} = \frac{u_e}{\frac{1}{A_u} + \beta_g}$$

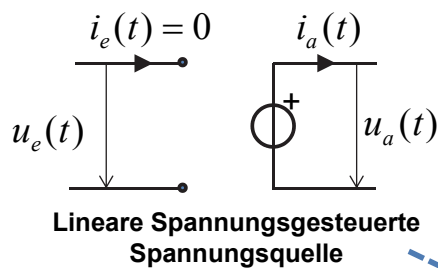
$$A_{ges} = \frac{u_a}{u_e} = \frac{1}{\frac{1}{A_u} + \beta_g} \rightarrow \lim_{A_u \rightarrow \infty} A_{ges} = \lim_{A_u \rightarrow \infty} \frac{1}{\frac{1}{A_u} + \beta_g} = \frac{1}{\beta_g}$$



4. Komponenten:

4.1 Messverstärker:

4.1.3 Ein Schritt weiter: idealisierter linearer Spannungsverstärker



$$R_e = \infty$$

$$R_a = 0$$

$$u_a(t) = A_u \cdot u_e(t)$$

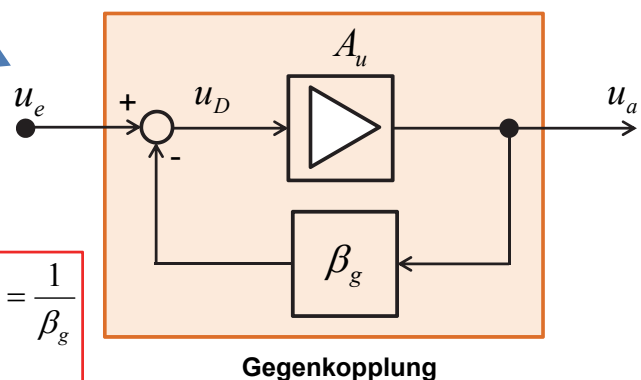
$$A_u \rightarrow \infty$$

$$u_a = u_D \cdot A_u = A_u \cdot (u_e - u_a \cdot \beta_g)$$

$$u_a \cdot (1 + A_u \cdot \beta_g) = A_u \cdot u_e$$

$$u_a = \frac{A_u \cdot u_e}{1 + A_u \cdot \beta_g} = \frac{u_e}{\frac{1}{A_u} + \beta_g}$$

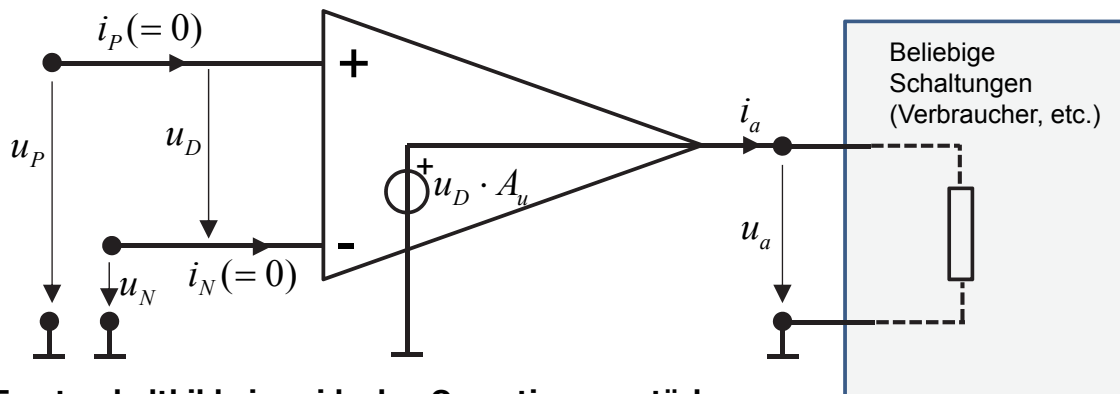
$$A_{ges} = \frac{u_a}{u_e} = \frac{1}{\frac{1}{A_u} + \beta_g} \rightarrow \lim_{A_u \rightarrow \infty} A_{ges} = \lim_{A_u \rightarrow \infty} \frac{1}{\frac{1}{A_u} + \beta_g} = \frac{1}{\beta_g}$$



4. Komponenten:

4.1 Messverstärker:

4.1.4 Idealer Operationsverstärker



Ersatzschaltbild eines idealen Operationsverstärker

$u_a = u_D \cdot A_u$ unabhängig von der Last!

i_a beliebig, von der Last abhängig

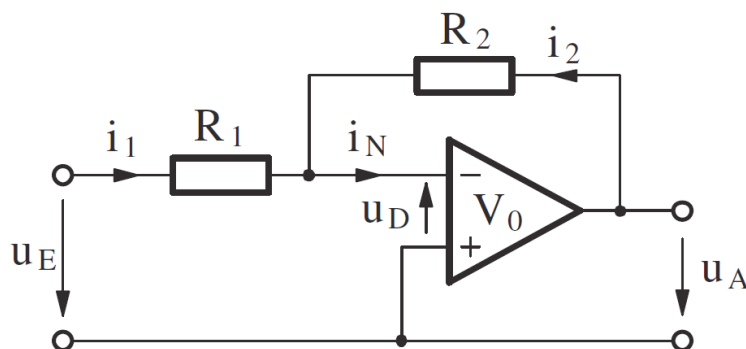
$i_P = 0, i_N = 0$ unabhängig von u_D

$A_u \rightarrow \infty$

4. Komponenten:

4.1 Messverstärker:

4.1.5 Idealer Operationsverstärker mit Gegenkopplung



$$i_2 = -i_1$$

$$u_D = \frac{u_A}{V_0} \text{ Annahme : } u_A \text{ ist endlich} \rightarrow \lim_{V_0 \rightarrow \infty} u_D = \lim_{V_0 \rightarrow \infty} \frac{u_A}{V_0} = 0$$

$$i_1 = \frac{u_E}{R_1}, \quad i_2 = -i_1, \rightarrow u_A = i_2 \cdot R_2 = -i_1 \cdot R_2 = -u_E \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

$$V = \frac{u_A}{u_E} = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$i_1 + i_2 = 0$$

$$u_E = R_1 i_1 - u_D$$

$$u_A = R_2 i_2 - u_D = V_0 u_D$$

$$V = \frac{u_A}{u_E} = \frac{-\frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{1}{V_0} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)}$$

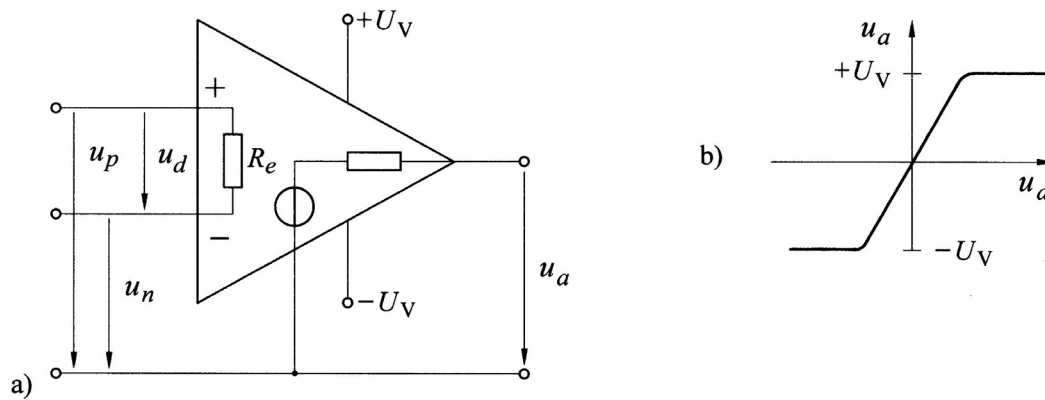
$$\lim_{V_0 \rightarrow \infty} V = \frac{u_A}{u_E} = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$V_g = -\frac{R_1}{R_2}$$

4. Komponenten:

4.1 Messverstärker:

4.1.6 Ersatzschaltbilder realer Operationsverstärker



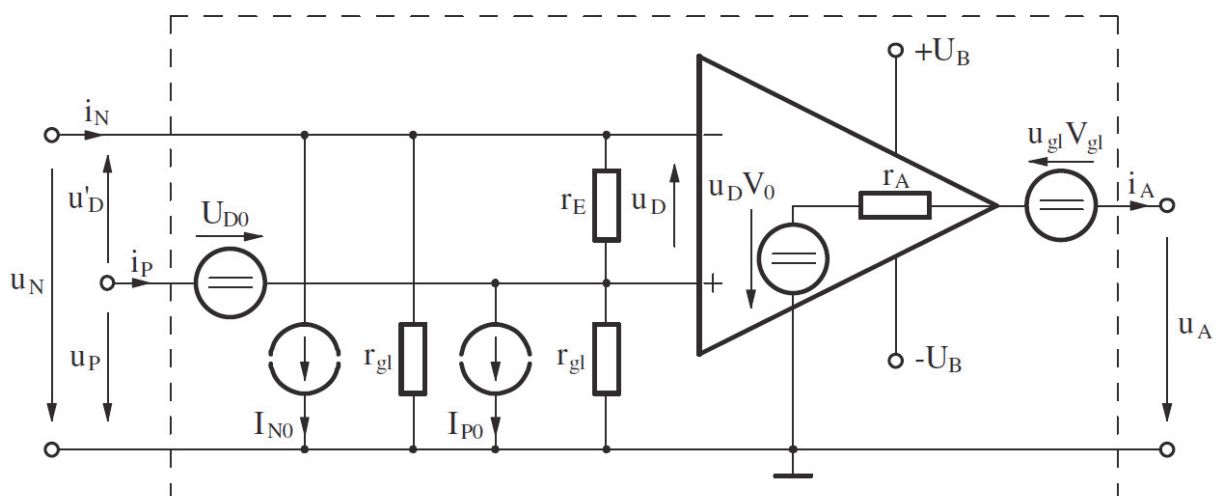
**Operationsverstärker:
Schaltbild (a) und Kennlinie (b)**

(E. Schröder: Elektrische Messtechnik)

4. Komponenten:

4.1 Messverstärker:

4.1.6 Ersatzschaltbilder realer Operationsverstärker



Kleinsignal-Ersatzschaltbild eines realen Operationsverstärkers

4. Komponenten:

4.1 Messverstärker:

4.1.7 Kenngrößen realer Operationsverstärker

- **Leerlaufspannungsverstärkung (open loop voltage gain) V_0**
Es handelt sich hierbei um die Differenzverstärkung der offenen Schleife, d. h. des nicht-rückgekoppelten, unbeschalteten Operationsverstärkers.

$$V_0 = \frac{\partial u_A}{\partial u_D}$$

- ideal: $V_0 \rightarrow \infty$
- real: $10^4 \leq V_0 \leq 10^7$

- **Leerlaufspannungsverstärkungsmaß V_0 [dB]**

$$V_0 \text{ [dB]} = 20 \lg V_0 = 20 \lg \left(\frac{\partial u_A}{\partial u_D} \right)$$

- ideal: $V_0 \rightarrow \infty$
- real: $80 \text{ dB} \leq V_0 \leq 140 \text{ dB}$

aus: R. Lerch: Elektrische Messtechnik

4. Komponenten:

4.1 Messverstärker:

4.4.4 Kenngrößen realer Operationsverstärker

- **Gleichtaktspannung (common mode voltage) u_{gl}**
Die Gleichtaktspannung entspricht dem arithmetischen Mittel der beiden Eingangsspannungen u_N und u_P

$$u_{gl} = \frac{u_P + u_N}{2}.$$

- **Gleichtaktspannungsverstärkung (common mode voltage gain) V_{gl}**
Bei einem realen Operationsverstärker erscheint die um den Faktor V_{gl} verstärkte Gleichtaktspannung U_{gl} am Ausgang

$$V_{gl} = \frac{\partial u_A}{\partial u_{gl}}.$$

- ideal: $V_{gl} = 0$
- real: $V_{gl} \approx 1$

- **Gleichtaktunterdrückung (common mode rejection ratio) CMRR**

$$\text{CMRR [dB]} = 20 \lg \left(\frac{V_0}{V_{gl}} \right)$$

- ideal: $\text{CMRR} \rightarrow \infty$
- real: $\text{CMRR} \approx 100 \text{ dB}$

aus: R. Lerch: Elektrische Messtechnik

4. Komponenten:

4.1 Messverstärker:

4.1.7 Kenngrößen realer Operationsverstärker

- Übertragungsfunktion (frequency response) $\underline{G}(\omega)$

Die komplexe Übertragungsfunktion $\underline{G}(\omega)$ von Operationsverstärkerschaltungen, die auch als Übertragungsfaktor bezeichnet wird, entspricht der komplexen Verstärkung, d. h. dem Verhältnis der in Zeigerform dargestellten Ausgangsspannung \underline{U}_A zur Differenzeingangsspannung \underline{U}_D . Diese Übertragungsfunktion lässt sich für reale Operationsverstärker nach Gl. (7.19) approximieren

$$\underline{G}(\omega) = \frac{\underline{U}_A(\omega)}{\underline{U}_D(\omega)} = \frac{V_0}{\left(1 + j\frac{\omega}{\omega_1}\right) \left(1 + j\frac{\omega}{\omega_2}\right)} \quad (7.19)$$

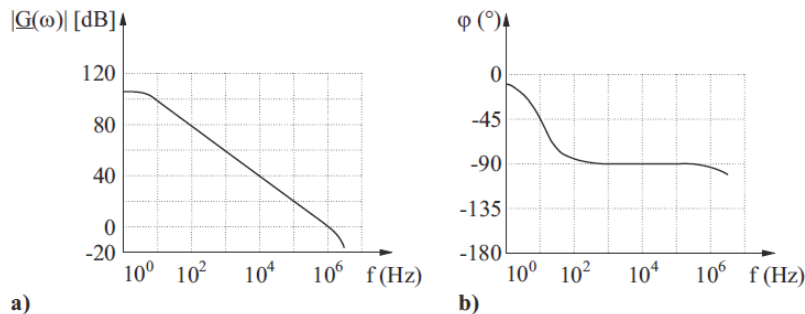


Abb. 7.7. Frequenzgang der Leerlaufspannungsverstärkung des Operationsverstärkers μA 741 ($U_B = \pm 15 V$) bei einer Temperatur von $25^\circ C$: a) Betrag, b) Phase

aus: R. Lerch: Elektrische Messtechnik

4. Komponenten:

4.1 Messverstärker:

4.1.7 Kenngrößen realer Operationsverstärker

- Gleichtaktingangswiderstand (common mode input resistance)

Der Gleichtaktingangswiderstand r_{gl} wird wie folgt berechnet

$$r_{gl} = \frac{\partial u_{gl}}{\frac{1}{2} \partial (i_P + i_N)}$$

- ideal: $r_{gl} = \infty$
- real: $r_{gl} = 1 G\Omega \dots 100 T\Omega$

- Differenzeingangswiderstand (differential input resistance) r_E

Da im allgemeinen der Gleichtaktwiderstand r_{gl} groß ist gegenüber dem Differenzeingangswiderstand r_E ($r_{gl} \gg r_E$), gilt folgende Definitionsgleichung für den Differenzeingangswiderstand

$$r_E = \frac{\partial u_D}{\frac{1}{2} \partial (i_P - i_N)}$$

- ideal: $r_E = \infty$
- real: $r_E = 1 M\Omega \dots 1 T\Omega$

- Ausgangswiderstand (output resistance) r_A

$$r_A = - \frac{\partial u_A}{\partial i_A} \Big|_{u_D = const.}$$

- ideal: $r_A = 0$
- real: $r_A = 2 \Omega \dots 100 \Omega$

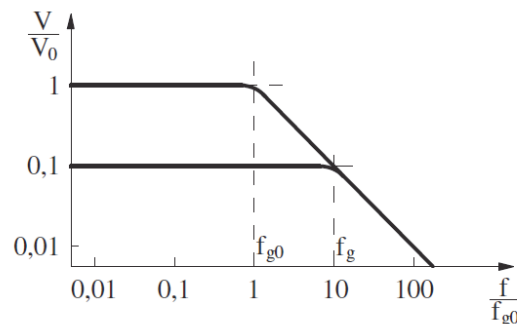
aus: R. Lerch: Elektrische Messtechnik

4. Komponenten:

4.1 Messverstärker:

4.1.7 Kenngrößen realer Operationsverstärker

- Verstärkungs-Bandbreite-Produkt (gain bandwidth product) $V f_g$**
 Wichtiger noch als der reine *Verstärkungsfaktor* ist das sogenannte *Verstärkungs-Bandbreite-Produkt* $f_{g0} V_0$, welches bei Universaltypen bei etwa $V_0 f_{g0} = 10^6$ Hz liegt und bei auf hohe Bandbreite ausgerichteten Operationsverstärkern bis zu $3 \cdot 10^9$ Hz reicht. Durch eine Gegenkopplungsschaltung gemäß Abb. 7.5 wird der *effektive Verstärkungsfaktor* V und die *effektive Grenzfrequenz* f_g der Meßschaltung eingestellt. Das Produkt aus Verstärkungsfaktor V und Bandbreite bzw. Grenzfrequenz f_g ist für Grenzfrequenzen oberhalb von f_{g0} ($f_g > f_{g0}$) bei einem bestimmten Operationsverstärkertyp stets ein konstanter Wert



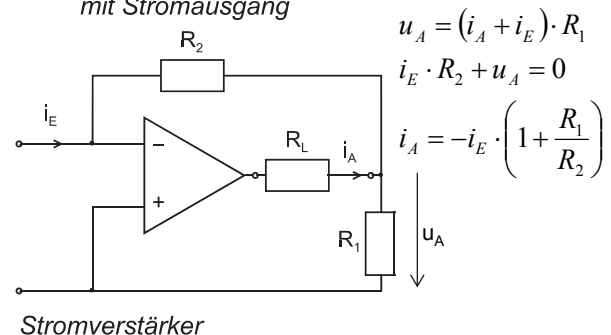
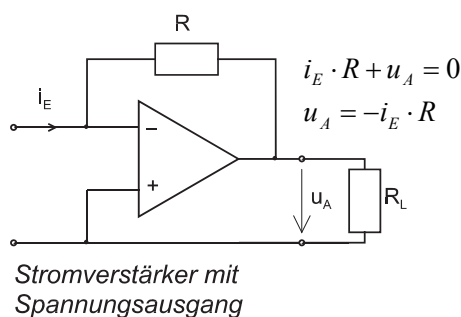
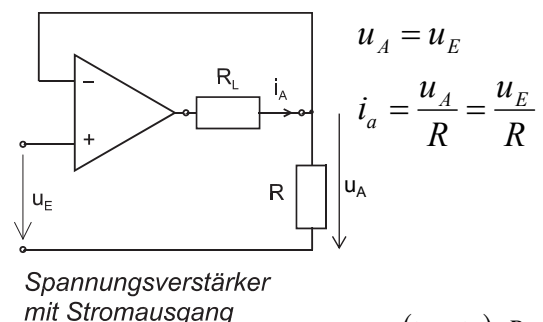
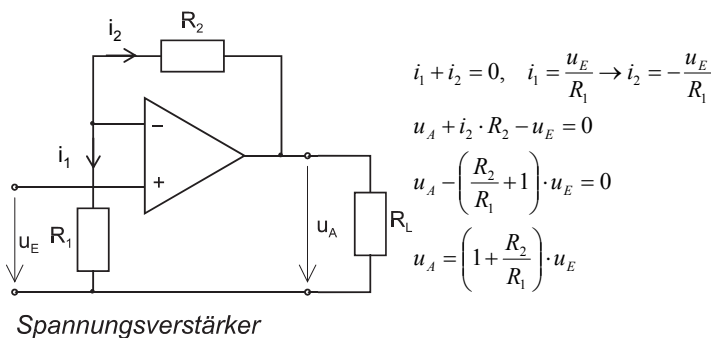
Kenngrößen von kommerziell verfügbaren Operationsverstärker gibt es in „R. Lerch: Elektrische Messtechnik“, siehe Tabelle 7.1

aus: R. Lerch: Elektrische Messtechnik

4. Komponenten:

4.1 Messverstärker:

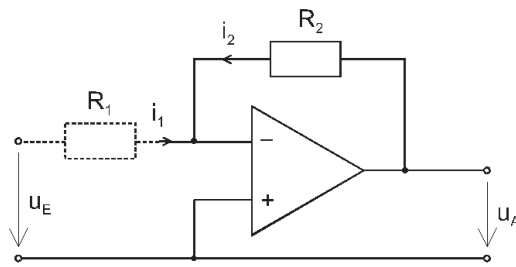
4.1.8 Operationsverstärker-Grundsaltungen



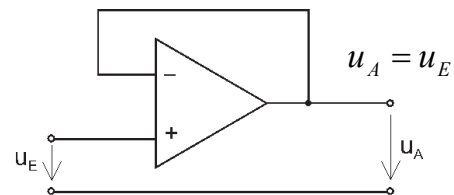
4. Komponenten:

4.1 Messverstärker:

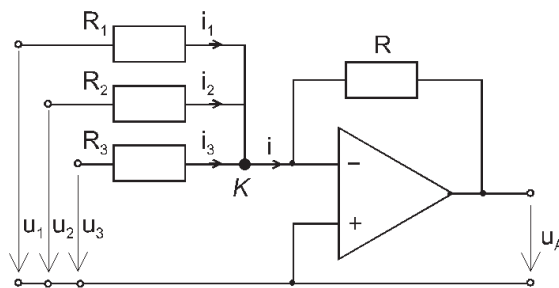
4.1.9 Arithmetische OP-Schaltungen



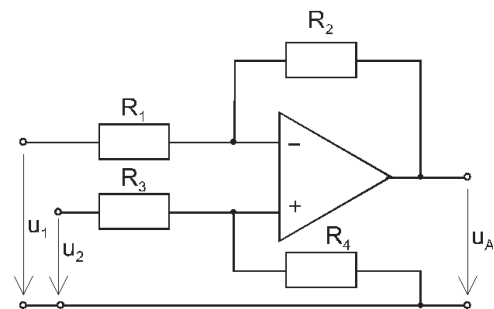
Spezialfall des I-U-Verstärkers:
Invertierender Verstärker



Spezialfall des U-U-Verstärkers:
Impedanzwandler, Spannungsfolger



Addierverstärker

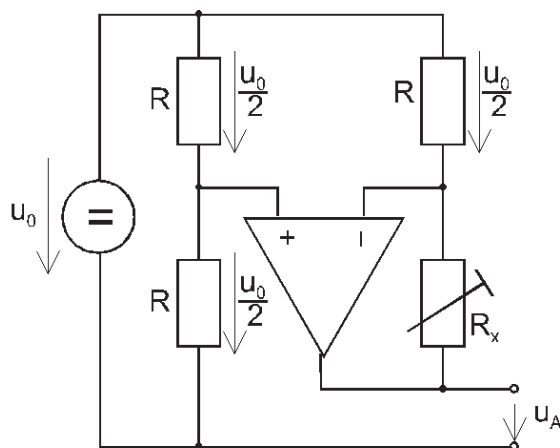


Subtrahierverstärker

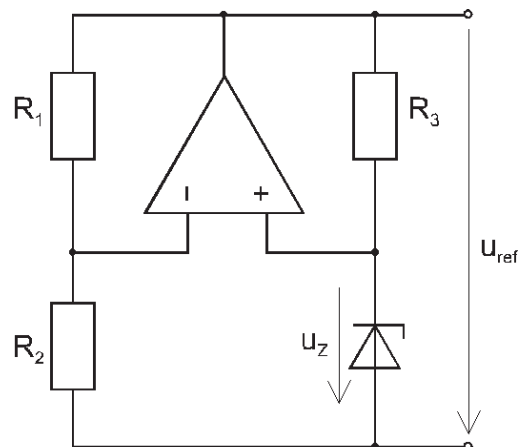
4. Komponenten:

4.1 Messverstärker:

4.1.10 OP-Brückenschaltungen



Aktive Brückenschaltung

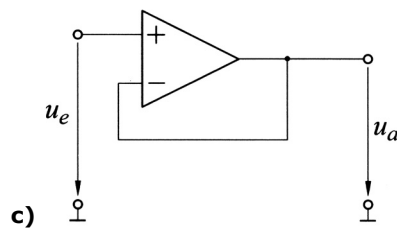
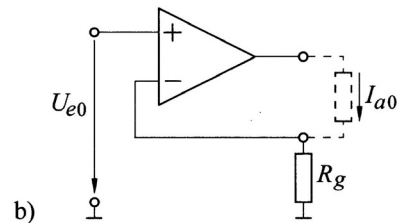
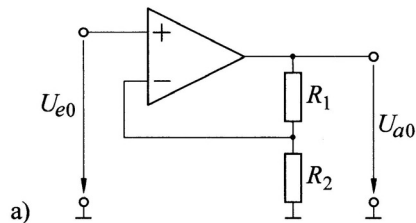


Präzisionsspannungsquelle

4. Komponenten:

4.1 Messverstärker:

4.1.11 Anwendungen mit OP-Verstärker



Gegengekoppelte Verstärker:

Konstantspannungsquelle (a),

Konstantstromquelle (b),

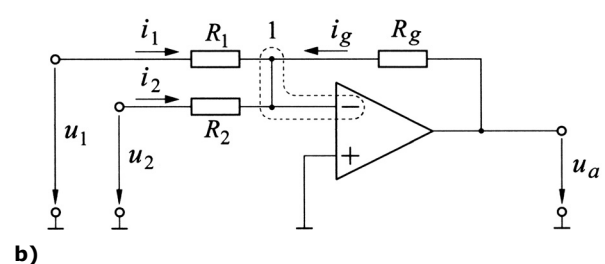
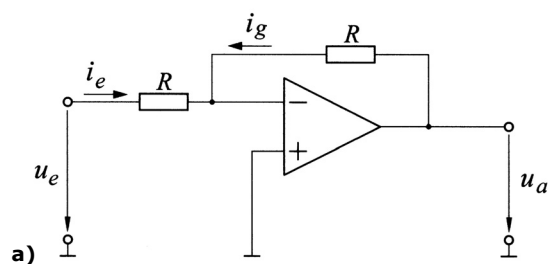
Spannungsfolger (c)

(E. Schrüfer: Elektrische Messtechnik)

4. Komponenten:

4.1 Messverstärker:

4.1.11 Anwendungen mit OP-Verstärker



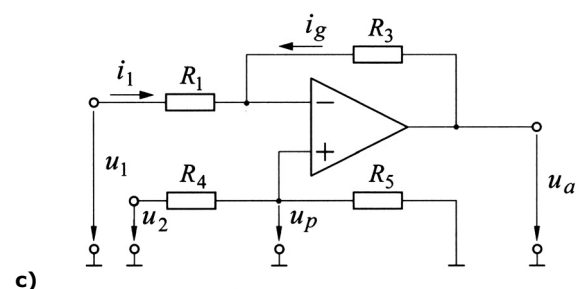
Invertierender Verstärker:

für Polaritätsumkehr (a),

Addition (b),

Subtraktion (c)

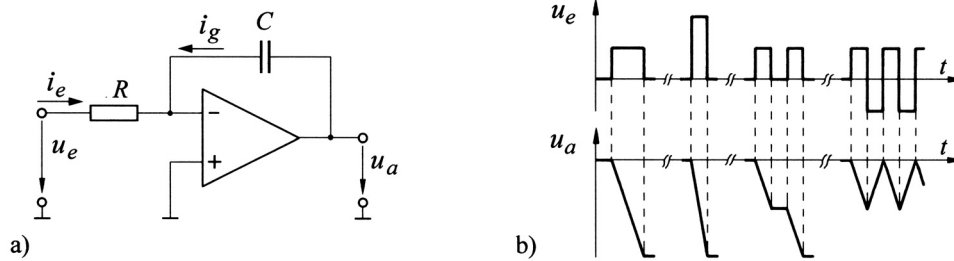
(E. Schrüfer: Elektrische Messtechnik)



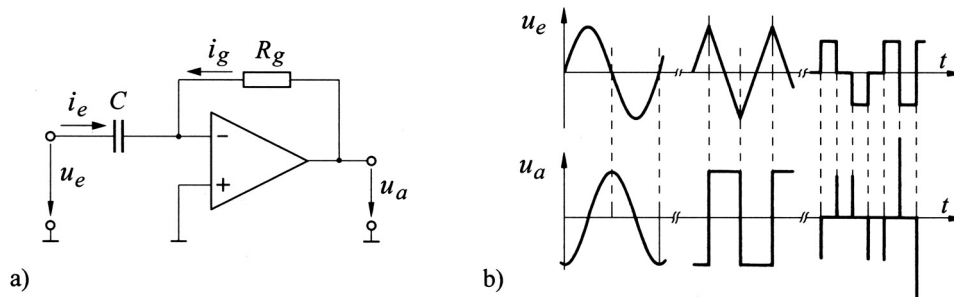
4. Komponenten:

4.1 Messverstärker:

4.1.11 Anwendungen mit OP-Verstärker



Integrierer: Schaltung (a) und Signale (b) (E. Schröder: Elektrische Messtechnik)

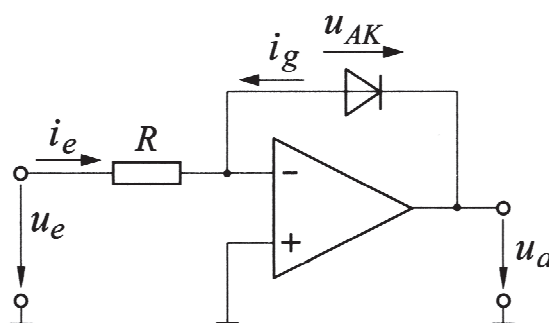


Differenzierer: Schaltung (a) und Signale (b) (E. Schröder: Elektrische Messtechnik)

4. Komponenten:

4.1 Messverstärker:

4.1.11 Anwendungen mit OP-Verstärker



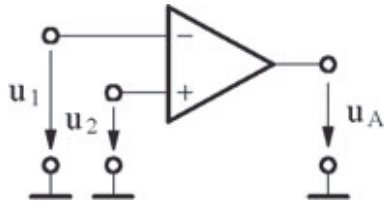
Logarithmierer

(E. Schröder: Elektrische Messtechnik)

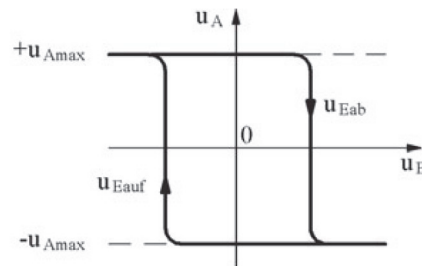
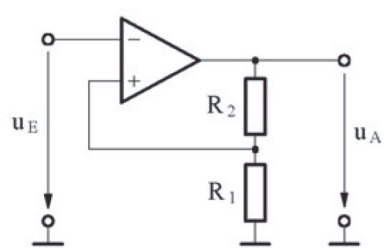
4. Komponenten:

4.1 Messverstärker:

4.1.12 Komparatoren mit OP



Komparator ohne Hysteresis



$$u_{Eauf} = -u_{Amax} \frac{R_1}{R_1 + R_2},$$

$$u_{Eab} = +u_{Amax} \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

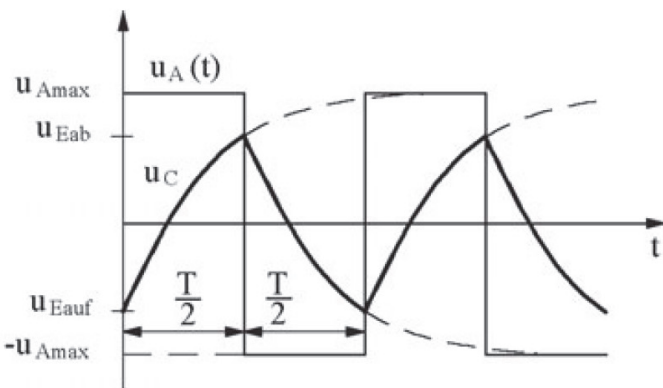
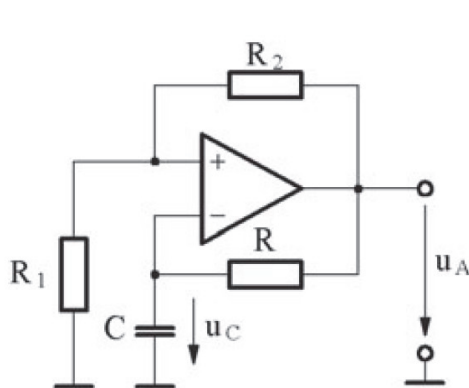
Invertierender Schmitt-Trigger: Operationsverstärkerschaltung und Kennlinien des invertierenden Schmitt-Triggers

aus: R. Lerch: Elektrische Messtechnik

4. Komponenten:

4.1 Messverstärker:

4.1.12 Multivibrator mit OP



Multivibrator mit Komparator und Spannungsverläufe in der Multivibrator-Schaltung

$$\frac{du_C}{dt} = \frac{\pm u_{Amax} - u_C}{RC}$$

$$u_C(t) = u_{Amax} \left(1 - \frac{2R_1 + R_2}{R_1 + R_2} e^{-t/RC} \right)$$

$$T = 2RC \ln \left(1 + \frac{2R_1}{R_2} \right)$$

$$R_1 = R_2$$

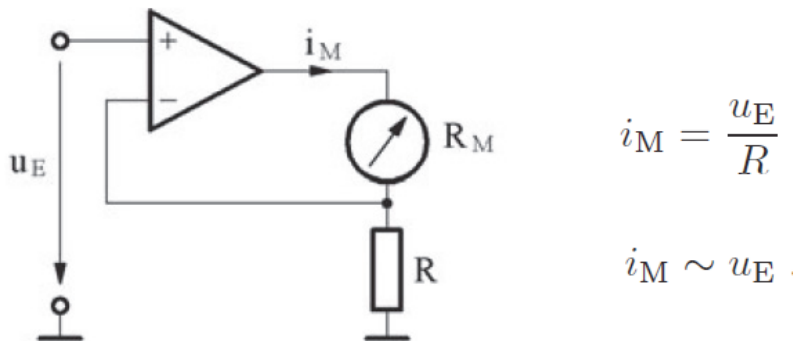
$$T = 2RC \ln 3 \approx 2,2RC$$

aus: R. Lerch: Elektrische Messtechnik

4. Komponenten:

4.1 Messverstärker:

4.1.13 Beispiel: Voltmeterschaltung



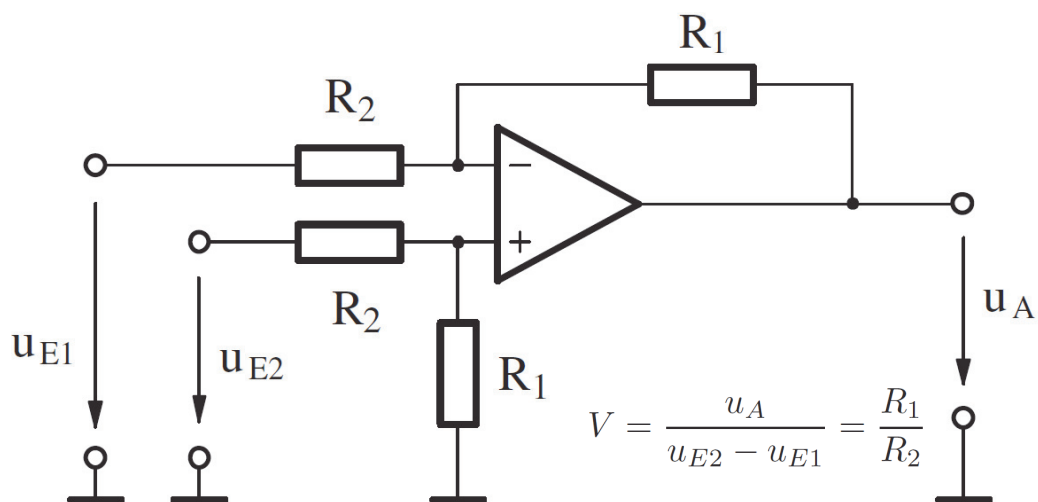
Voltmeterschaltung: hochohmige Spannungsmessung mit einem Strommessgerät

aus: R. Lerch: Elektrische Messtechnik

4. Komponenten:

4.1 Messverstärker:

4.1.13 Beispiel: Differenzverstärker



Differenzverstärker

Bei der Berücksichtigung der Eingangswiderstand R_i :

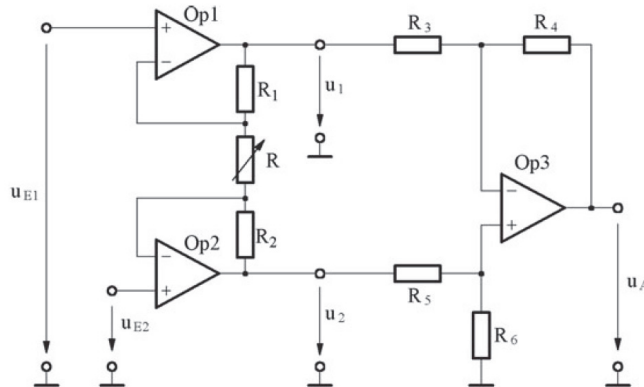
$$V \rightarrow V = \frac{R_1}{R_2 + R_i}$$

aus: R. Lerch: Elektrische Messtechnik

4. Komponenten:

4.1 Messverstärker:

4.1.13 Beispiel: Instrumentenverstärker



$$u_1 = u_{E1} + R_1 \frac{u_{E1} - u_{E2}}{R} = \left(1 + \frac{R_1}{R}\right) u_{E1} - \frac{R_1}{R} u_{E2}$$

$$u_2 = u_{E2} - R_2 \frac{u_{E1} - u_{E2}}{R} = \left(1 + \frac{R_2}{R}\right) u_{E2} - \frac{R_2}{R} u_{E1}$$

$$u_{E1} = u_{E2} = u_{gl} \quad \Rightarrow \quad \frac{u_1}{u_{gl}} = \frac{u_2}{u_{gl}} = 1$$

$$\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_6}{R_5} \quad \Rightarrow \quad u_A = \frac{R_4}{R_3} (u_2 - u_1)$$

Instrumentenverstärker

$$\frac{u_A}{u_{E2} - u_{E1}} = \frac{R_4}{R_3} \left(1 + \frac{R_1 + R_2}{R}\right)$$

Symmetrische Aufbau: $R_1 = R_2 = R'$ und $R_3 = R_4 = R_5 = R_6$:

$$\frac{u_A}{u_{E2} - u_{E1}} = 1 + \frac{2R'}{R}$$

aus: R. Lerch: Elektrische Messtechnik

Literatur für Kap 4.1

Autor	Titel	Verlag
R. Lerch	Elektrische Messtechnik Kapitel 7	Springer Verlag
E. Schröder L. Reindl B. Zagar	Elektrische Messtechnik Kapitel 2.3	Hanser Verlag