3./4. Semester

Elektronik

Operationsverstärker 1 und 2

Andreas Zbinden*

Gewerblich-Industrielle Berufsschule Bern, GIBB

Zusammenfassung

In diesem Dokument werden der prinzipielle Aufbau und die Eigenschaften des idealen Operationsverstärkers sowie die Grundschaltungen erklärt. Das Prinzip der Mit- und Gegenkopplung wird gezeigt und der Einfluss der Gegenkopplung auf die Verstärkung und Bandbreite beschrieben. Der Inhalt richtet sich nach dem aktuellen Lehrplan für ElektronikerIn EFZ an der GIBB und dient als Arbeitshilfsmittel im Unterricht.

*Dipl.El.Ing.FH, Lehrperson ElektronikerIn EFZ, MultimediaelektronikerIn EFZ

Inhalt

1 Einleitung **3**

2 Mit-,Gegenkopplung, Bandbreite **5**

3 Grundschaltungen **6**
3.1 Impedanzwandler 6
3.2 Nicht invertierender Verstärker 7
3.3 Invertierender Verstärker 8

4 Anwendungen **10**
4.1 Gleichspannungsverstärker 10
4.2 Wechselspannungsverstärker 12
4.3 Invertierender Verstärker als Schalter 13
4.4 Summierverstärker 13
4.5 Konstantstromquelle 14
4.6 Referenzspannungsquelle 15
4.7 Subtrahierverstärker (Differenzverstärker) 16
4.8 Instrumentation Amplifier 18
4.9 Schmitt-Trigger 20

1 Einleitung

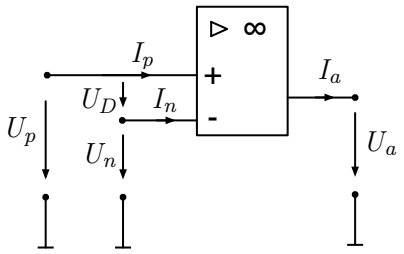


Abb. 1: Symbol, Spannungen und Ströme beim OPV

Das kleine Dreieck mit nachfolgendem Unendlichzeichen symbolisiert einen Verstärker mit sehr hoher Verstärkung. Operationsverstärker verstärken die an den Eingängen liegende Differenzspannung.

$$U_D = U_p - U_n \tag{1}$$

Die Differenzverstärkerstufe am Eingang verstärkt die Differenzspannung beim idealen OPV um den Leerlaufverstärkungsfaktor. Die Ausgangsstufe koppelt das Signal niederohmig auf den Ausgang. Die Versorgungsspannung ist im Regelfall symmetrisch zur Masse.

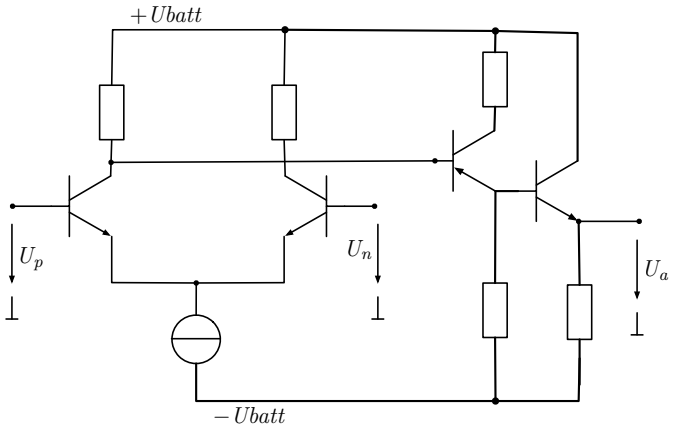


Abb. 2: Differenzverstärker: Durch die gemeinsame Konstantstromquelle an den Emitteranschlüssen der Transistoren wird der Strom auf die beiden Transistoren verteilt je nachdem wir gross Up resp. Un ist. Dementsprechend wird die Ausgangsstufe angesteuert.

Tab. 1: Kenngrössen OPV

Grösse	ideal	real
Leerlaufverstärkung	∞	typ. $1 \cdot 10^5$
Eingangswiderstand r_D, Diff. Widerstand zwischen + und −	∞	$> 1 \cdot 10^6\,\Omega$
Ausgangswiderstand r_a	0	einige $10\,\Omega$
Gleichtaktunterdrückung G	∞	$> 1 \cdot 10^4$
Verstärkungs-Bandbreite-Produkt f_T	∞	typ. einige MHz

Bezüglich Aufbau werden folgende Operationsverstärker unterschieden:

- ▷ Bipolare OP's z.B. LM741
- ▷ OP's mit Sperrschicht-FET's am Eingang (BiFET) z.B. TL081
- ▷ OP's mit MOS-FET am Eingang (BiMOS)
- ▷ OP's mit nur MOS-FET's aufgebaut (CMOS)z.B. TLC27

Neue Typen werden mittlerweile nur noch in den SMD-Plastikgehäuse Mini-DIP und SOIC angeboten. Standard-DIP wird vor allem für ältere Typen verwendet. Bausteine, welche MIL Spezifikationen erfüllen, werden zudem noch in TO- und Keramik-DIP (DIC) angeboten. Zahlreiche Sondergehäuse werden für Isolationsverstärker und andere Spezial-OpAmp benutzt.

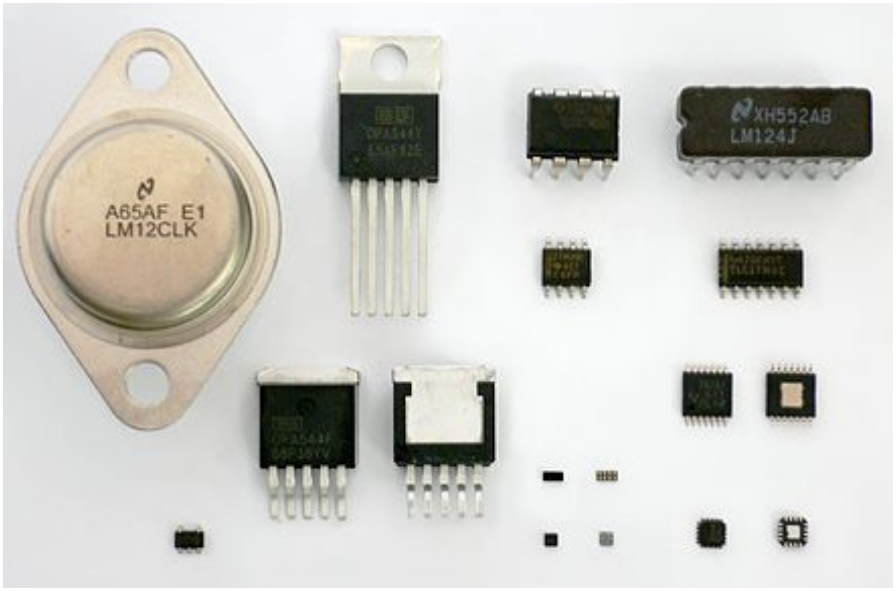
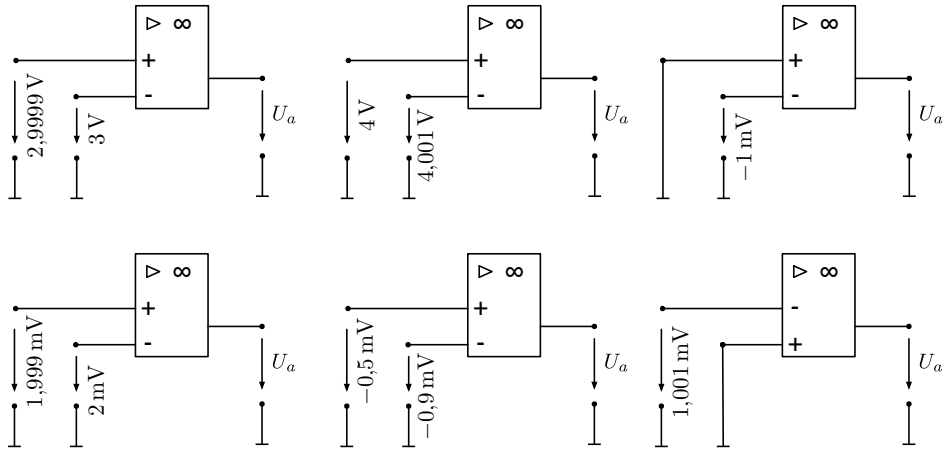


Abb. 3: Ausführungen OPV

Aufgabe 1.1. Berechnen Sie die Ausgangsspannungen bezogen auf Masse. Die OPV's sind mit symmetrischer Spannung gegen Masse gespiesen.



2 Mit-,Gegenkopplung, Bandbreite

Der unbeschaltete Operationsverstärker wird kaum eingesetzt; er wird meistens mit Gegenkopplung betrieben. Der OPV wird am Ausgang lediglich zwischen positiver und negativer Speisespannung kippen da seine Verstärkung unendlich gross ist.

$$Up > Un: \quad Ua = v \cdot (Up - Un) = +\infty$$
$$Up < Un: \quad Ua = v \cdot (Up - Un) = -\infty$$

Deshalb wird mit einer Gegenkopplung die Verstärkung begrenzt.

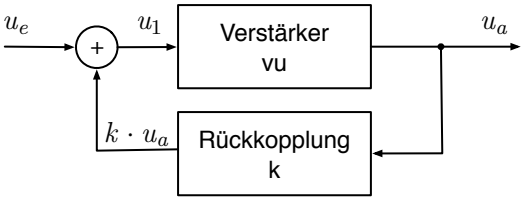


Abb. 4: Prinzip der Gegenkopplung

Wenn $k < 0$ ist, wird von einer Gegenkopplung gesprochen und bei $k > 0$ von Mitkopplung. Gegenkopplung wird bei Verstärkern eingesetzt und Mitkopplung bei Kippschaltungen.

$$v = \frac{u_a}{u_e} \qquad u_1 = u_e - k \cdot u_a \rightarrow u_e = u_1 + k \cdot u_a \qquad u_a = v_u \cdot u_1 \tag{2}$$

$$v = \frac{v_u \cdot u_1}{u_1 + k \cdot u_a} = \frac{v_u \cdot u_1}{u_1 + k \cdot v_u \cdot u_1} = \frac{v_u}{1 + k \cdot v_u} \tag{3}$$

Die Verstärkung wird also praktisch nur von k bestimmt.
Durch die Gegenkopplung wird

1. die Stabilität verbessert
2. die Verstärkung kleiner, dafür aber praktisch unabhängig vom Verstärkerelement
3. der Klirrfaktor verbessert
4. die Bandbreite erhöht

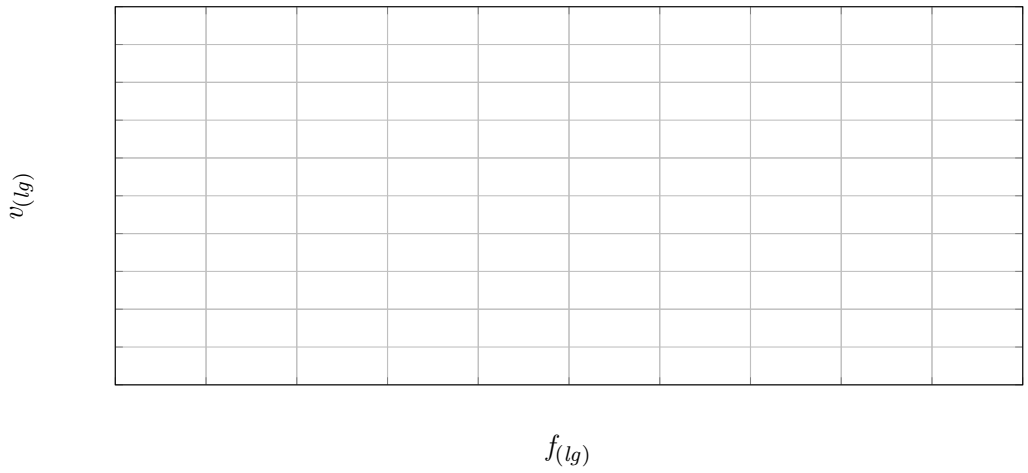


Abb. 5: Einfluss der Gegenkopplung auf die Bandbreite

3 Grundschaltungen

3.1 Impedanzwandler

Eine vollständige Gegenkopplung ($k = 1$) wird mit der Rückführung der Ausgangsspannung Ua auf den negativen Eingang des Operationsverstärkers erreicht.

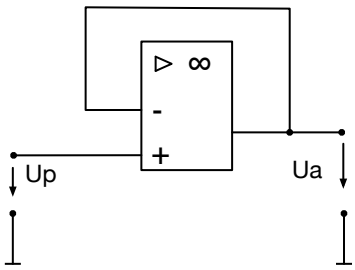


Abb. 6: Verstärker mit voller Gegenkopplung

Berechnung der Verstärkung:

$$
\begin{aligned}
v &= \frac{Ua}{Up} \\
Ua &= v_0(Up - Un) \\
Ua &= v_0\,Up - v_0\,Un \qquad (Ua = Un) \\
v_0\,Up &= Ua(1 + v_0) \\
v &= \frac{Ua}{Up} = \frac{v_0}{1 + v_0} \approx 1
\end{aligned} \tag{4}
$$

Die Verstärkung wird also bei voller Gegenkopplung (k=1) ungefähr 1. D.h. die Ausgangsspannung Ua ist gleich der Eingangsspannung Up. Deshalb wird die Schaltung auch *Spannungsfolger* genannt.

Wegen dem hohen Eingangswiderstand $re \to \infty$ und dem niedrigen Ausgangswiderstand $ra \to 0$ wird die Schaltung als *Impedanzwandler* eingesetzt.

3.2 Nicht invertierender Verstärker

Anstelle der vollständigen Gegenkopplung wird hier nur ein Teil der Ausgangsspannung mittels eines Spannungsteilers an den Eingang gegengekoppelt($-1 < k < 0$).

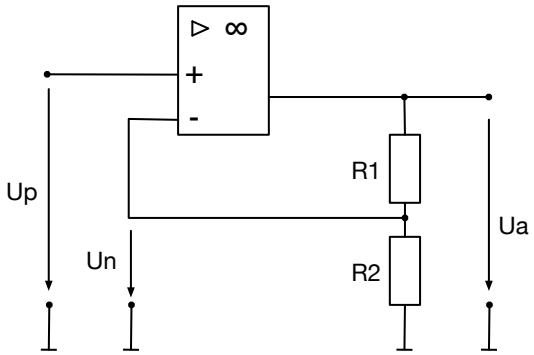


Abb. 7: Teilgegenkopplung mittels Spannungsteiler beim nicht invertierenden Verstärker

Berechnung der Verstärkung:

$$
\begin{aligned}
v &= \frac{Ua}{Up} \\
Un &= Ua\frac{R2}{R1+R2} \\
Ua &= v_0\left(Up - Ua\frac{R2}{R1+R2}\right) = v_0 Up - v_0 Ua\frac{R2}{R1+R2} \\
v_0 Up &= Ua + v_0 Ua\frac{R2}{R1+R2} \\
\frac{Ua}{Up} &= \frac{v_0}{1+v_0\frac{R2}{R1+R2}} = \frac{1}{\frac{1}{v_0}+\frac{R2}{R1+R2}} \\
v &= \frac{R1+R2}{R2} = \frac{R1}{R2}+1
\end{aligned}
\tag{5}
$$

Der Eingangswiderstand ist auch bei dieser Schaltung sehr hoch. Er entspricht ungefähr dem Gleichtaktwiderstand. $re \to \infty$. v entspricht der Steigung der Kurve $Ua = f(Ue)$

3.3 Invertierender Verstärker

Im Unterschied zur Schaltung gemäss Abbildung 8 wird hier die Eingangsspannung nicht beim positiven Eingang Up angeschlossen, sondern beim negativen Eingang Un.

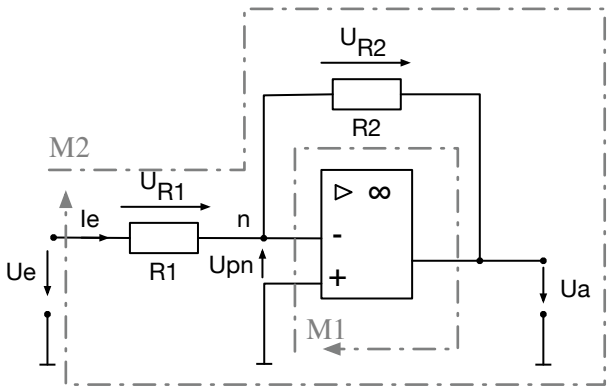


Abb. 8: Teilgegenkopplung beim invertierenden Verstärker

Berechnung der Verstärkung:

$$v = \frac{Ua}{Ue}$$
$$Ua = v_0(Up - Un) \qquad Up = 0\,\mathrm{V}$$
$$Ua = v_0(-Un) \qquad Un = ?$$

Die Berechnung wird mit dem Maschenansatz fortgeführt:

Masche 1: $Upn + U_{R2} + Ua = 0 \qquad Upn = 0\,\mathrm{V} \qquad$ weil $v_0 \to \infty \quad Upn = \frac{Ua}{\infty} = 0$

$$U_{R2} + Ua = 0 \qquad \text{Punkt n ist virtuell auf Masse gelegt}$$

Masche 2: $U_{R1} + U_{R2} + Ua - Ue = 0 \quad (U_{R1} = Ue)$

$$\frac{Ue - Ua}{R1 + R2} R2 + Ua = 0$$
$$R2\,Ue - R2\,Ua = -R1\,Ua - R2\,Ua$$
$$\frac{Ua}{Ue} = -\frac{R2}{R1} = v \tag{6}$$

Der Eingangswiderstand entspricht ungefähr R1. v entspricht der Steigung der Kurve $Ua = f(Ue)$. Achtung bei Schaltungen bei denen $Up \neq 0\,\mathrm{V}$ ist $\to Ua \neq v \cdot Ue$. Ersetzen Sie den LF411 mit einem OPA643 und vergleichen Sie die Resultate.

Aufgabe 3.1. Simulieren Sie folgende Schaltung und stellen Sie die Spannungen Ue, Un und Ua als Funktion der Zeit dar.

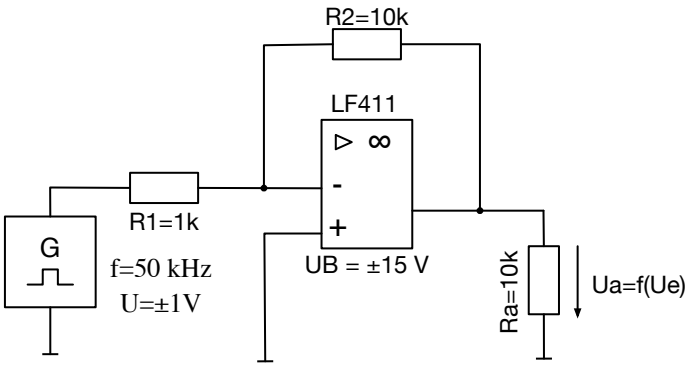


Abb. 9

4 Anwendungen

4.1 Gleichspannungsverstärker

Es sollen die fehlenden Werte berechnet werden: Ue, $R2$, alle Ströme u. Spannungen (richtig eingezeichnet), Ausgangsstrom des OPV.

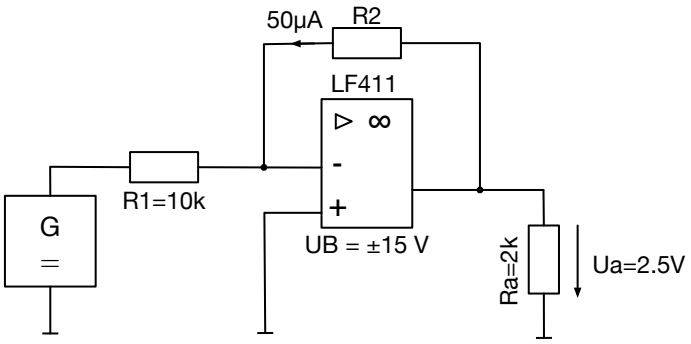


Abb. 10

Aufgabe 4.1. Gesucht ist die Übertragungskennlinie $Ua = f(Ue)$.

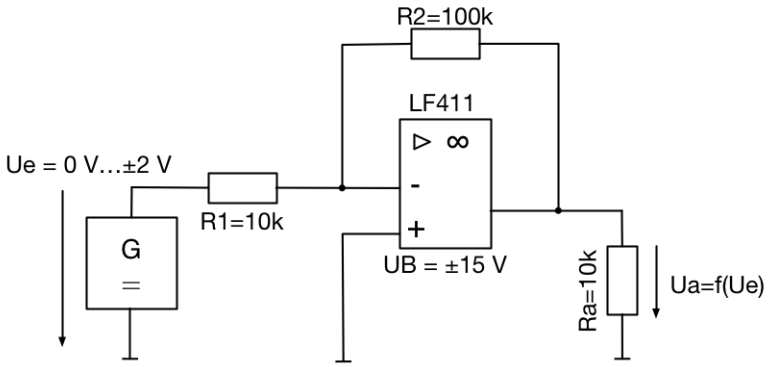


Abb. 11: Gleichspannungsverstärker

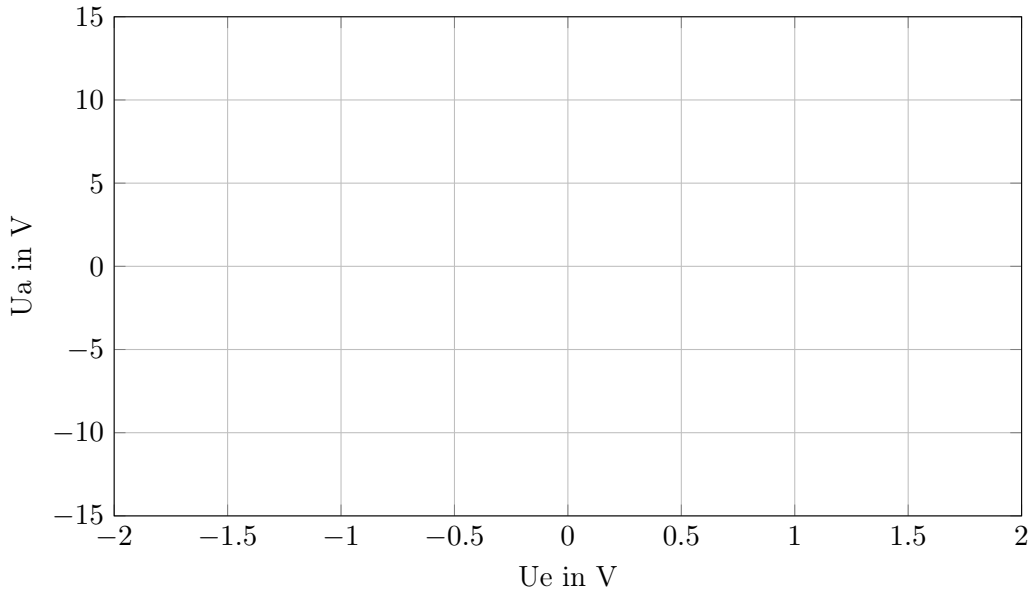


Abb. 12: Übertragungskennlinie des Gleichspannungsverstärkers; Ua=f(Ue)

Aufgabe 4.2. Simulieren Sie die Schaltung und stellen Sie die Übertragungskennlinie $Ua = f(Ue)$ für verschiedene Verstärkungen und verschiedene Up dar.

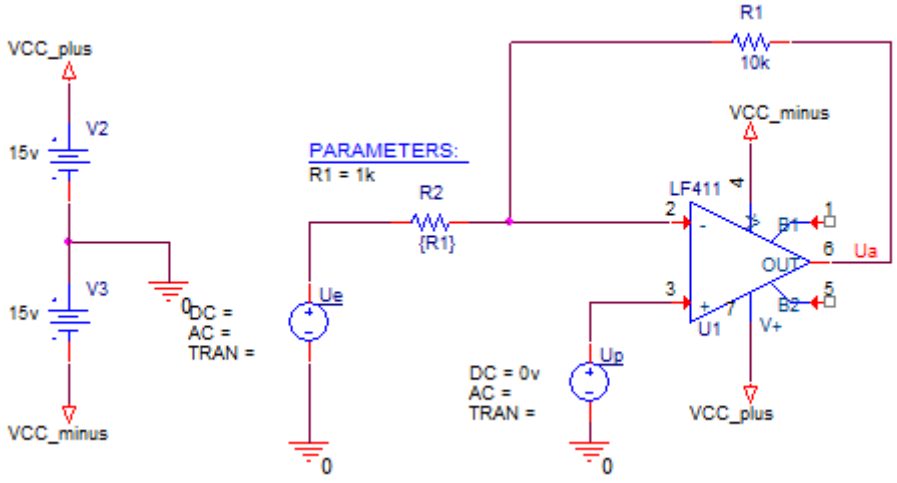


Abb. 13

4.2 Wechselspannungsverstärker

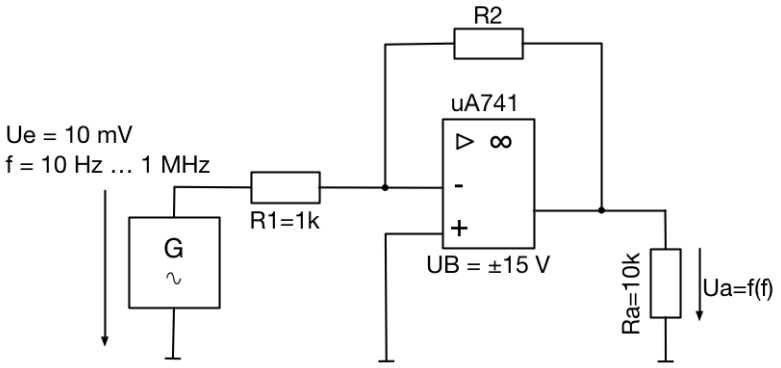


Abb. 14: Wechselspannungsverstärker

Aufgabe 4.3. Es soll der Amplitudengang für zwei Verstärkungsfaktoren ($v_{u1} = 10$, und $v_{u2} = 100$) mit PSpice simuliert werden. Die x-Achse (f) soll logarithmisch dargestellt werden und die y-Achse (v_u) in dB. Berechnen Sie zuerst R2 für beide Verstärkungsfaktoren. Bestimmen Sie aus den beiden Amplitudengängen die Bandbreiten.

4.3 Invertierender Verstärker als Schalter

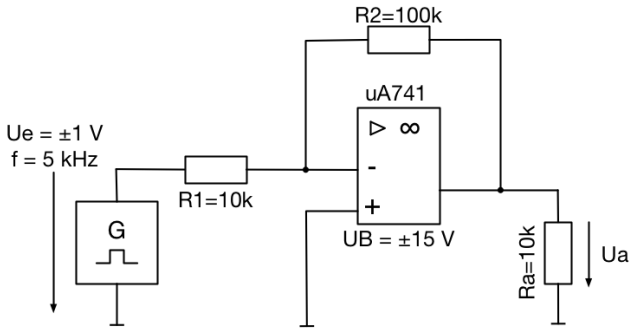


Abb. 15: Invertierender Verstärker als Schalter

Die Slew Rate in V/s oder Anstiegsgeschwindigkeit zeigt das Verhalten des Operationsverstärkers bei schnellen Änderungen der Eingangsspannung. Sie ist abhängig von der Verstärkung.

Anstiegsverzerrungen können bereits unterhalb der Bandbreite auftreten (besser sind FET-OP's).

$$f_{max} = \frac{\text{Slew Rate}}{2\pi\, Ua_{pp}} \tag{7}$$

Aufgabe 4.4. Simulieren Sie die Schaltung mit PSpice und stellen Sie $Ua = f(t)$ dar.

4.4 Summierverstärker

Der Summierverstärker ist eine Erweiterung des invertierenden Verstärkers.

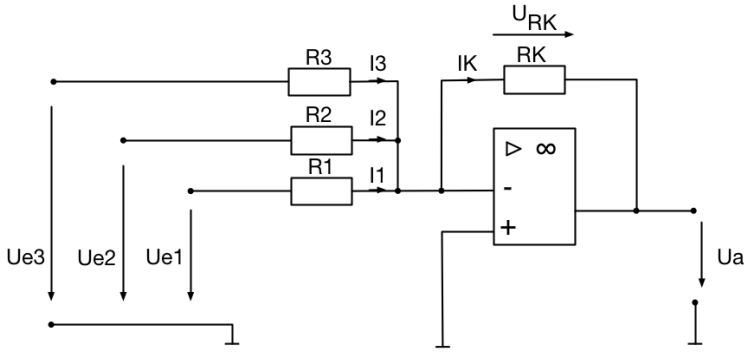


Abb. 16: Summierverstärker

$$I1 + I2 + I3 = IK$$

$$\frac{Ue1}{R1} + \frac{Ue2}{R2} + \frac{Ue3}{R3} = \frac{U_{RK}}{RK} = \frac{-Ua}{RK}$$

$$Ua = -RK \left(\frac{Ue1}{R1} + \frac{Ue2}{R2} + \frac{Ue3}{R3} \right) \tag{8}$$

Eingangsspannungen werden je nach Wahl der Widerstände $R1, R2$ und $R3$ verstärkt und vorzeichenrichtig addiert.

Aufgabe 4.5. Zu einem Sinusgenerator ($U_{eff} = 0\,\mathrm{V}...1\,\mathrm{V}$, $f = 2\,\mathrm{kHz}$) soll eine Zusatzschaltung berechnet werden welche das Signal auf maximal $\pm 5\,\mathrm{V}$ verstärkt. Zusätzlich soll dem Signal mit einem Potentiometer ein Gleichspannungsoffset bis zur positiven und negativen Aussteuergrenze überlagert werden können. Die Speisung beträgt $\pm 18\,\mathrm{V}$, der Operationsverstärker wird mit $\pm 15\,\mathrm{V}$ gespiesen. Zeichnen Sie das Schema und berechnen Sie alle Elemente und simulieren Sie die Schaltung mit PSpice.

4.5 Konstantstromquelle

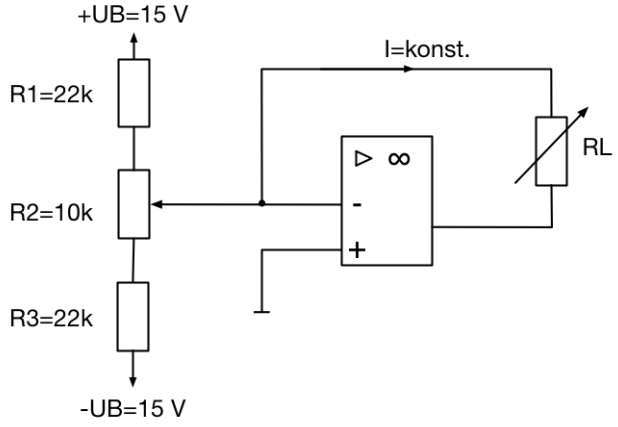


Abb. 17: Konstantstromquelle

4.6 Referenzspannungsquelle

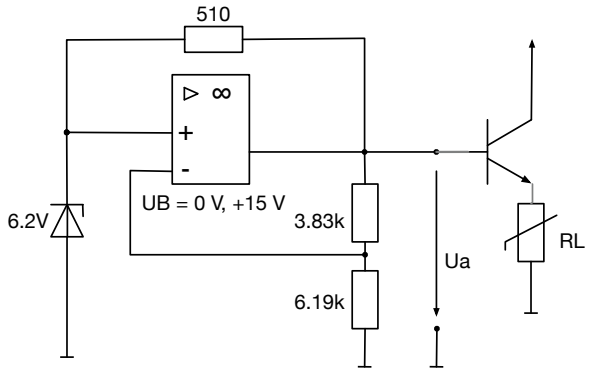


Abb. 18: Referenzspannungsquelle

4.7 Subtrahierverstärker (Differenzverstärker)

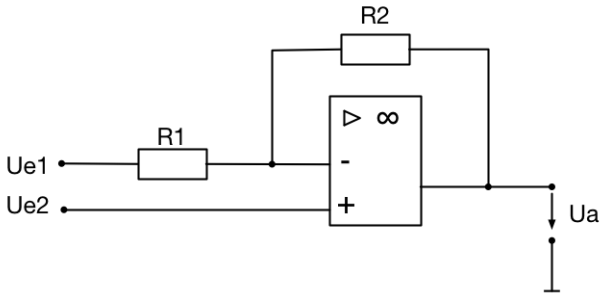


Abb. 19: Prinzip des Subtrahierverstärkers

Wenn $Ue1 = 0\,\mathrm{V}$ ist erhält man einen nicht invertierender Verstärker mit der entsprechenden Verstärkung v_{u1}. Ist $Ue2 = 0\,\mathrm{V}$ erhält man einen invertierenden Verstärker mit der entsprechenden Verstärkung v_{u2}. Bei gleichzeitiger Ansteuerung der Eingänge erfolgt eine Überlagerung. Nachteilig ist hier die unterschiedliche Verstärkung von $Ue1$ und $Ue2$.

$$Ua = Ue2\left(1 + \frac{R2}{R1}\right) - Ue1\frac{R2}{R1} \tag{9}$$

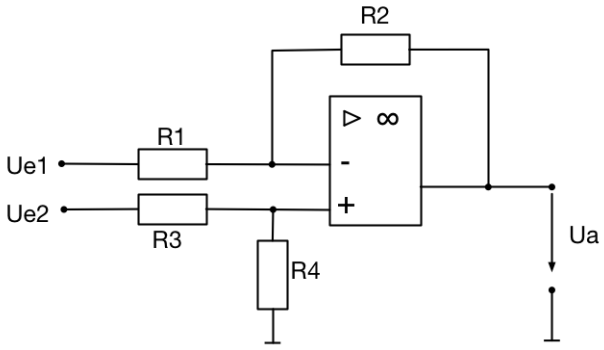


Abb. 20: Verbesserter Subtrahierverstärker

Berechnung:

Aufgabe 4.6. Wie gross muss R2 sein damit die Brücke bei 0 °C abgeglichen ist? Bei welcher Temperatur wird $Ua = 5\,\mathrm{V}$? $Ub = 15\,\mathrm{V}$; Sensor: $R_{20} = 2\,\mathrm{k\Omega}$, $\alpha = 6{,}2 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{K}^{-1}$ Bei 0 °C soll $Ua = 0\,\mathrm{V}$ sein.

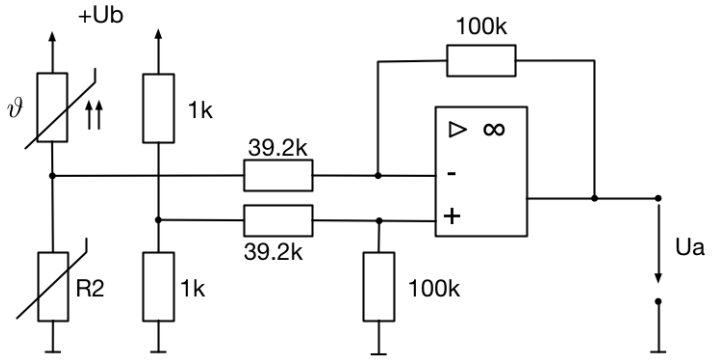


Abb. 21: Temperaturmessung mit Sensor und Brückenspannungsverstärker

4.8 Instrumentation Amplifier

Der Instrumentenverstärker funktioniert wie ein Differenz- oder Subtrahierverstärker. Die beiden Eingangssignale werden dem einfachen Subtrahierverstärker über zwei vorgeschaltete Impedanzwandler zur Erhöhung der Eingangswiderstände zugeführt.

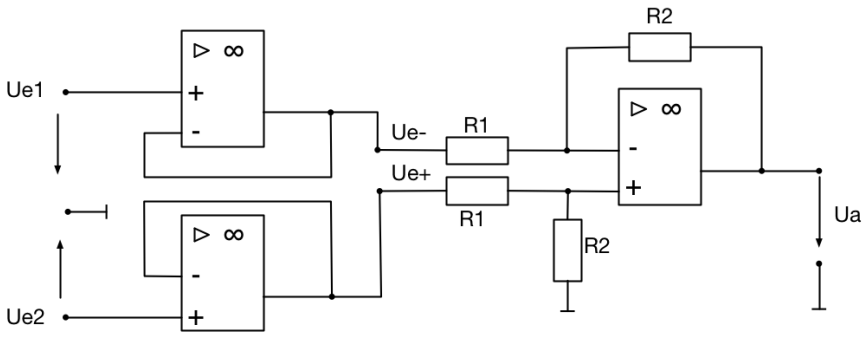


Abb. 22: Instrumentenverstärker Prinzip

$$Ua = \frac{R2}{R1}(Ue_+ - Ue_-) = \frac{R2}{R1}(Ue2 - Ue1) \tag{10}$$

Damit zusätzlich die Gleichtaktunterdrückung verbessert werden kann, wird dem eigentlichen Subtrahierverstärker die Verstärkung von nur 1 zugewiesen. Die eigentliche Signalverstärkung wird von den nicht invertierenden Eingangsverstärkern übernommen und kann mit R2 eingestellt werden:

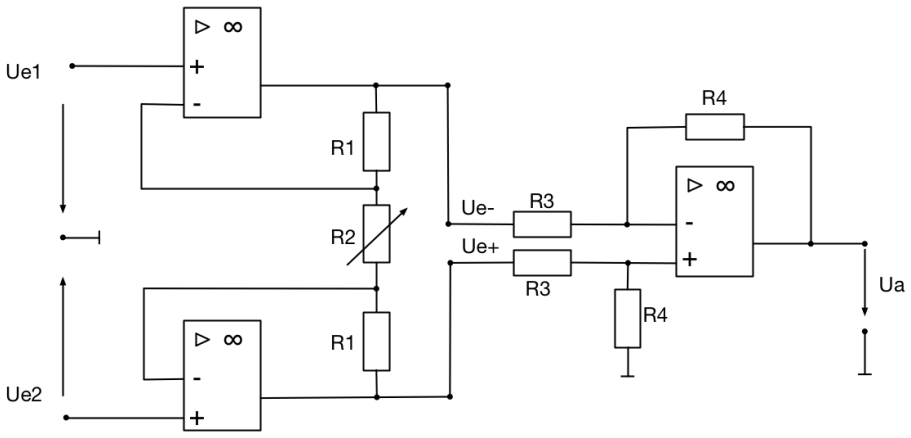


Abb. 23: Verbesserter Instrumentenverstärker

Berechnung der Ausgangsspannung:

4.9 Schmitt-Trigger

4.9.1 Komparatoren

Wird ein Operationsverstärker ohne Gegenkopplung betrieben, erhält man bereits einen Komparator. Wegen der hohen Verstärkung spricht die Schaltung auf sehr kleine Differenzspannungen U_D an; zwei Spannungen lassen sich mit hoher Genauigkeit vergleichen.

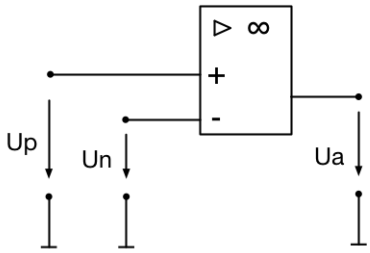


Abb. 24: Komparator

4.9.2 Fensterkomparator

Mit einem Fensterkomparator lässt sich feststellen, ob die Eingangsspannung Ue im Bereich zwischen zwei Vergleichsspannungen $U2$ und $U1$ ist.

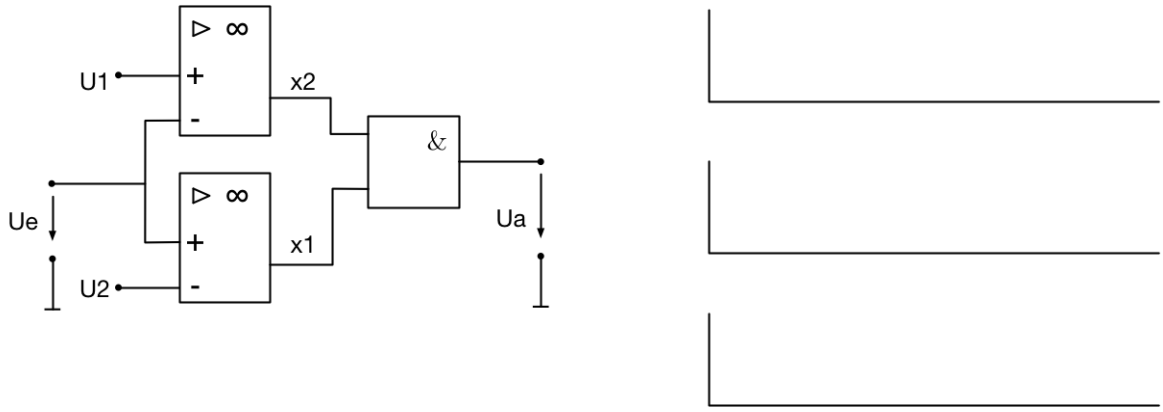


Abb. 25: Fensterkomparator

4.9.3 Nicht invertierender Schmitt-Trigger

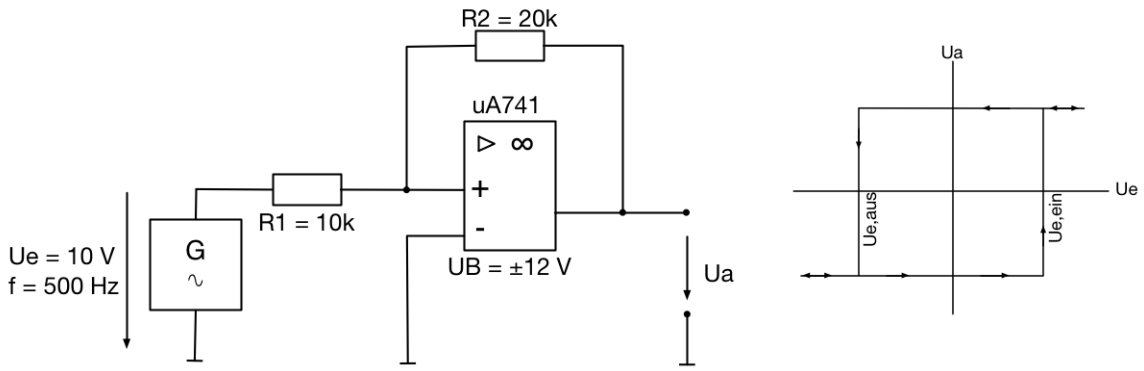
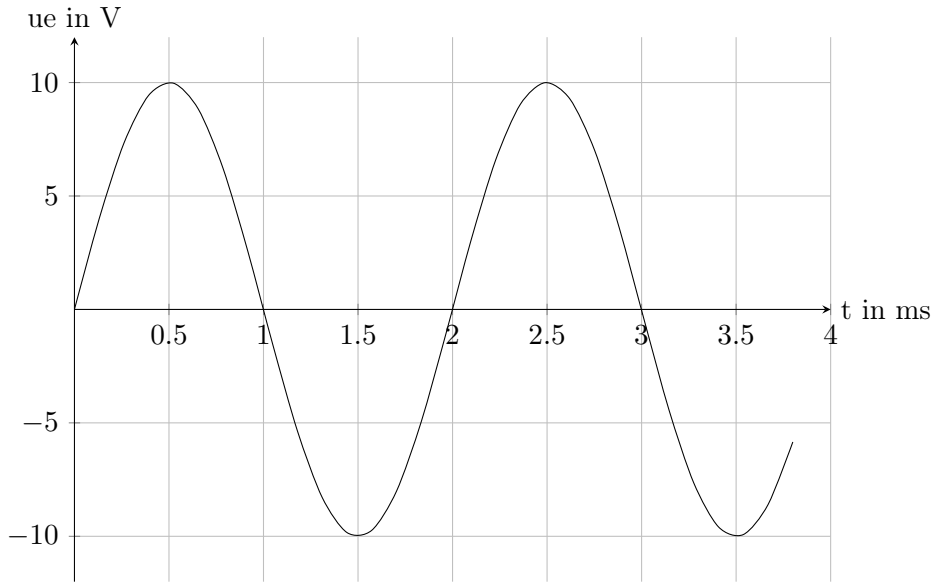


Abb. 26: Nicht invertierender Schmitt-Trigger mit Übertragungskennlinie



4.9.4 Invertierender Schmitt-Trigger

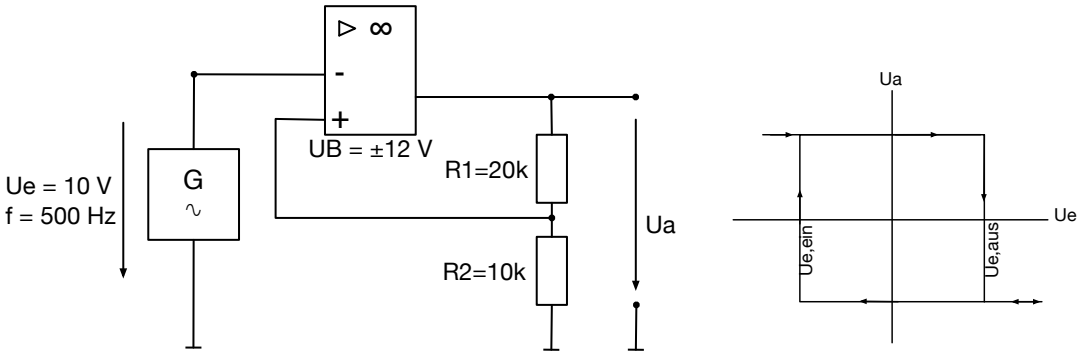
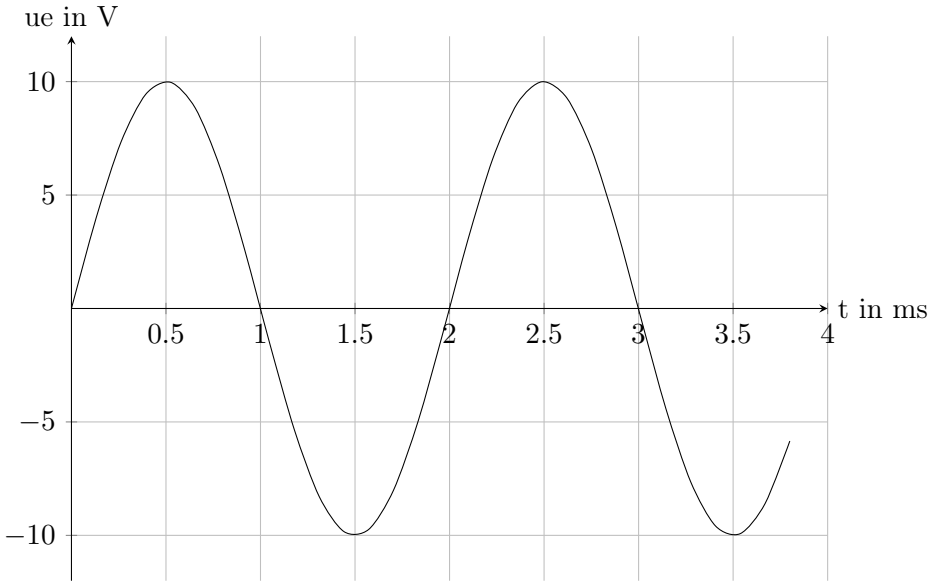


Abb. 27: Invertierender Schmitt-Trigger mit Übertragungskennlinie



4.9.5 Schmitt-Trigger mit Einfachspeisung

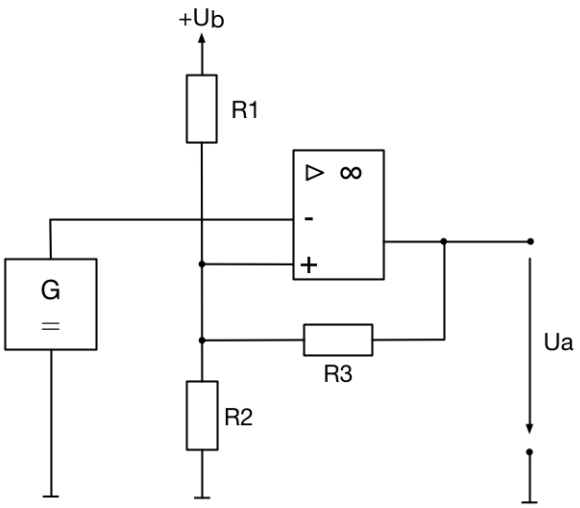


Abb. 28: Schmitt-Trigger mit Einfachspeisung

4.9.6 Präzisions-Schmitt-Trigger

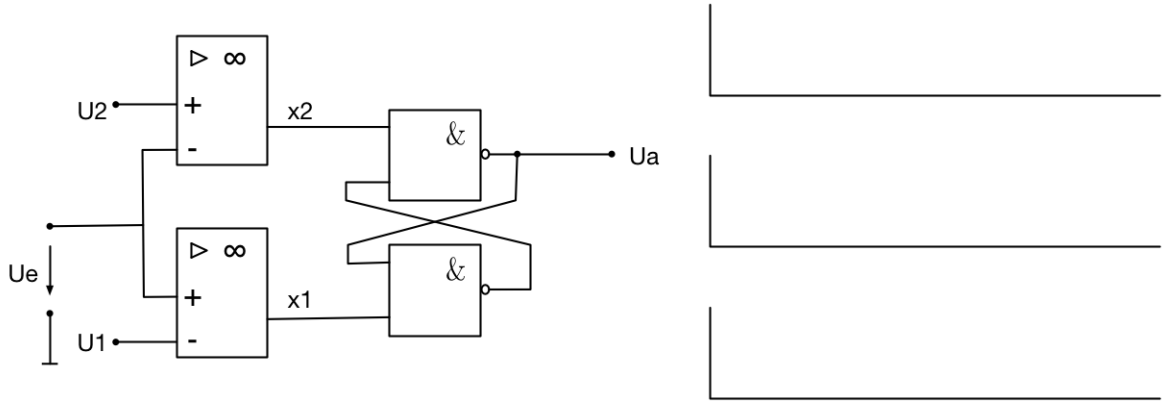


Abb. 29: Präzisions-Schmitt-Trigger