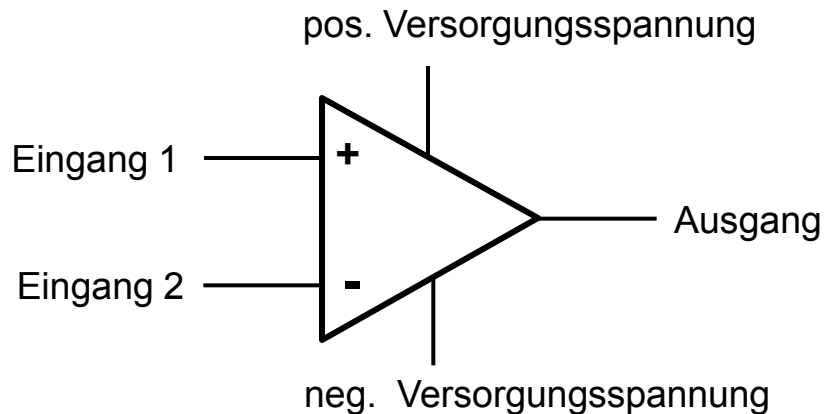


7. Operationsverstärker (OpAmp)

7.1 Einführung

zwei Eingänge

- invertierender Eingang (-)
- nichtinvertierender Eingang (+)



Differenzverstärker

Die Differenz der beiden Eingangsspannungen wird verstärkt und am Ausgang ausgegeben.

Vielfältige Anwendungsmöglichkeiten

Durch eine äußere Beschaltung kann der OpAmp vielfältig eingesetzt werden:

Signalformung: Messverstärker, Begrenzer, Funktionsgenerator,

Filter: Tief-, Hoch- und Bandpässe

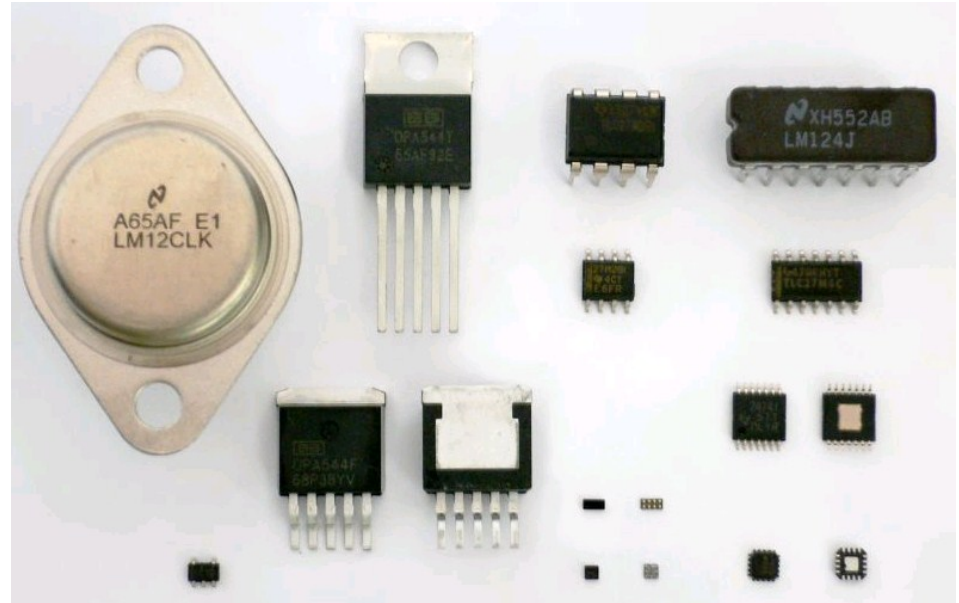
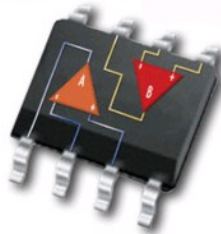
Rechenschaltungen: Signaladdierer, -subtrahierer, -integrierer, -differenzierer, ...

Preis

einige Cent einige Euro

Einige Ausführungsformen

(s. Wikipedia)



Versorgungsspannung

Wir meist mit 2 symmetrischen Versorgungsspannungen betrieben:

z.B. $\pm 5V$, $\pm 12V$, $\pm 15V$

Max. Ausgangsstrom

Der max. Ausgangsstrom von OpAmps liegt etwa im Bereich von 10 50 mA, ist also für geringe Belastungen ausgelegt (Spezialausführungen ausgenommen).

Im Allg. ist der Ausgang kurzschlussfest.

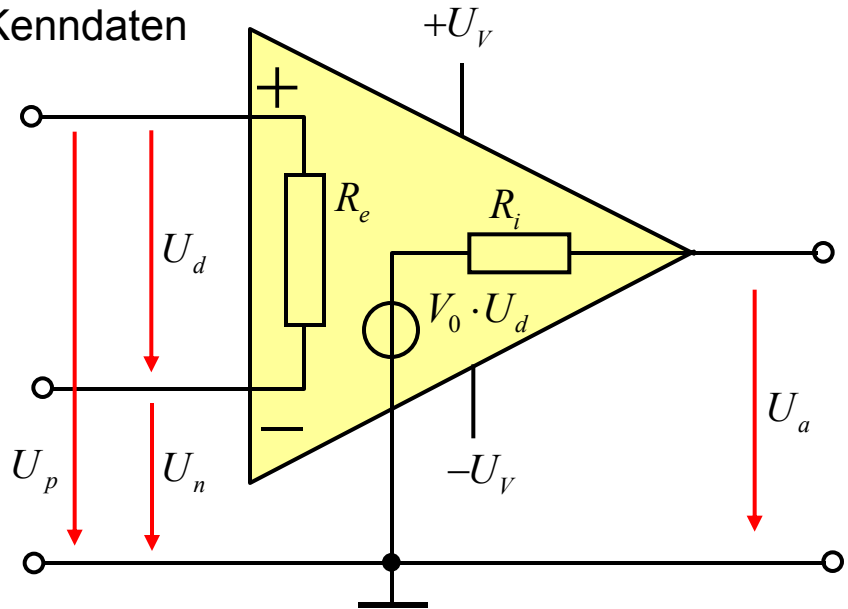
7.2 Einfaches Ersatzschaltbild und einige Kenndaten

U_p : nichtinvertierender Eingang

U_n : invertierender Eingang

U_d : Differenzspannung

U_a : Ausgangsspannung



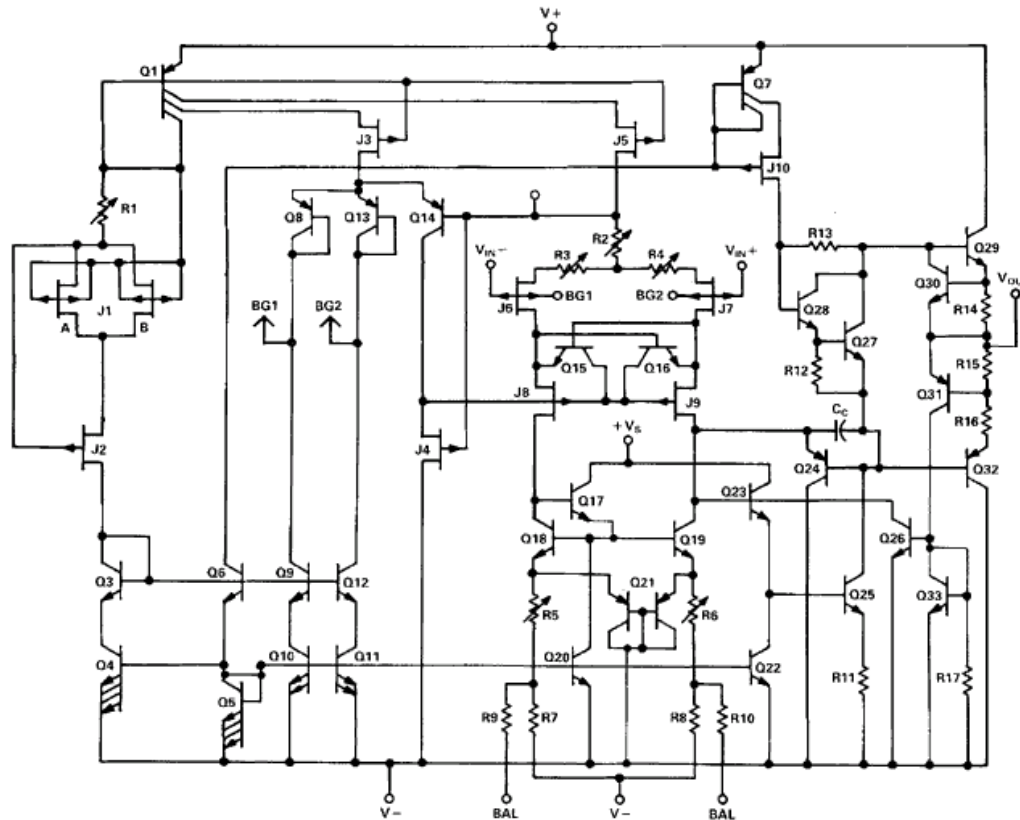
Differenzverstärker: $U_a = V_0 \cdot U_d = V_0 \cdot (U_p - U_n)$

Verstärkung V_0 : sehr hoch (typ. $10^5 - 10^7$)

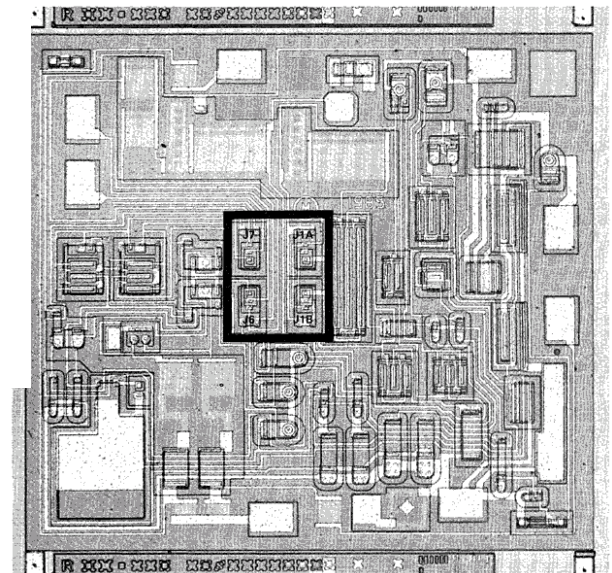
Eingangswiderstand R_e : sehr hoch (typ. $10^6 - 10^{12} \Omega$)

Ausgangswiderstand R_i : niedrig (typ. $10 - 1000 \Omega$)

Beispiel: Schaltung und Chiplayout eines OpAmps



siehe <http://home.earthlink.net/~goodclose/isscc86.html>



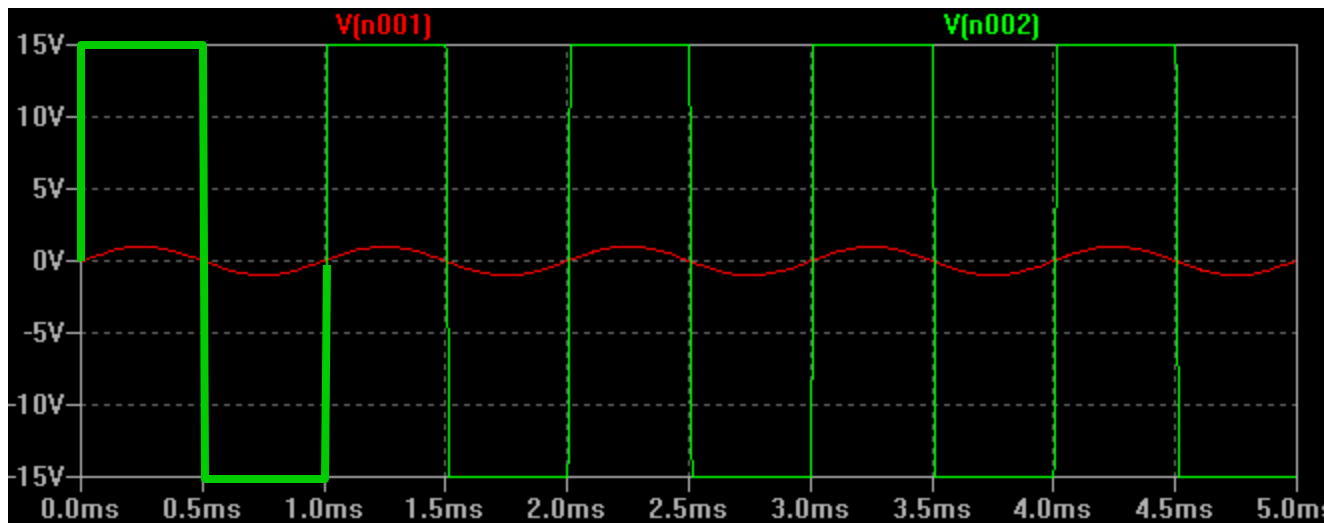
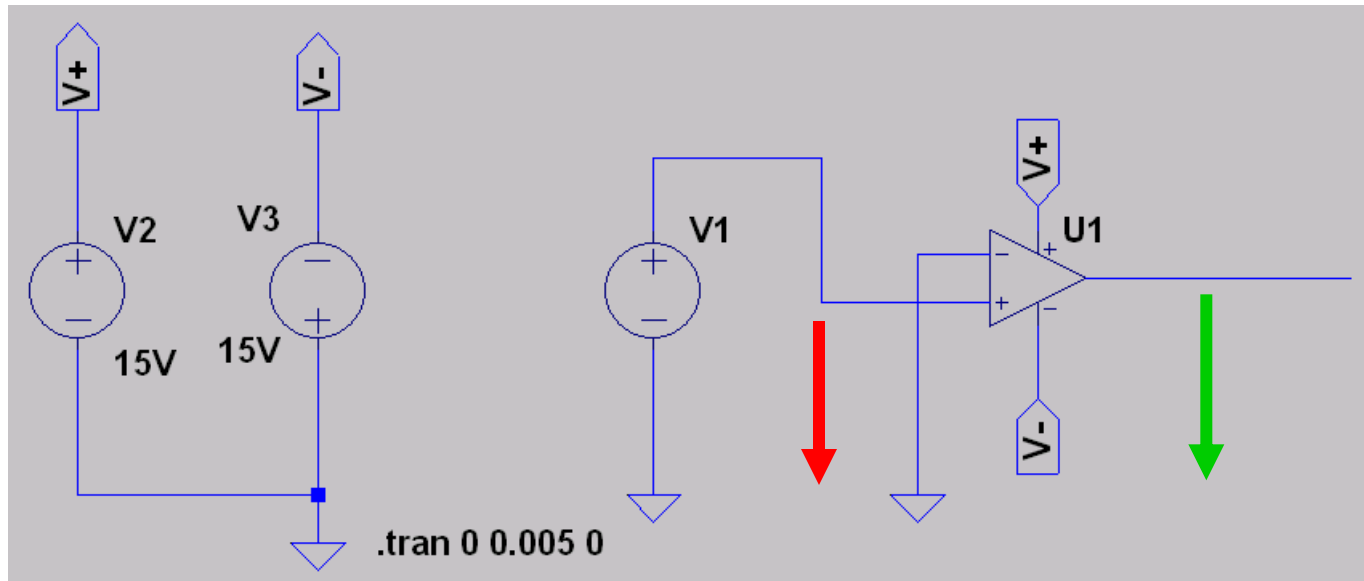


7.3 Idealer Operationsverstärker

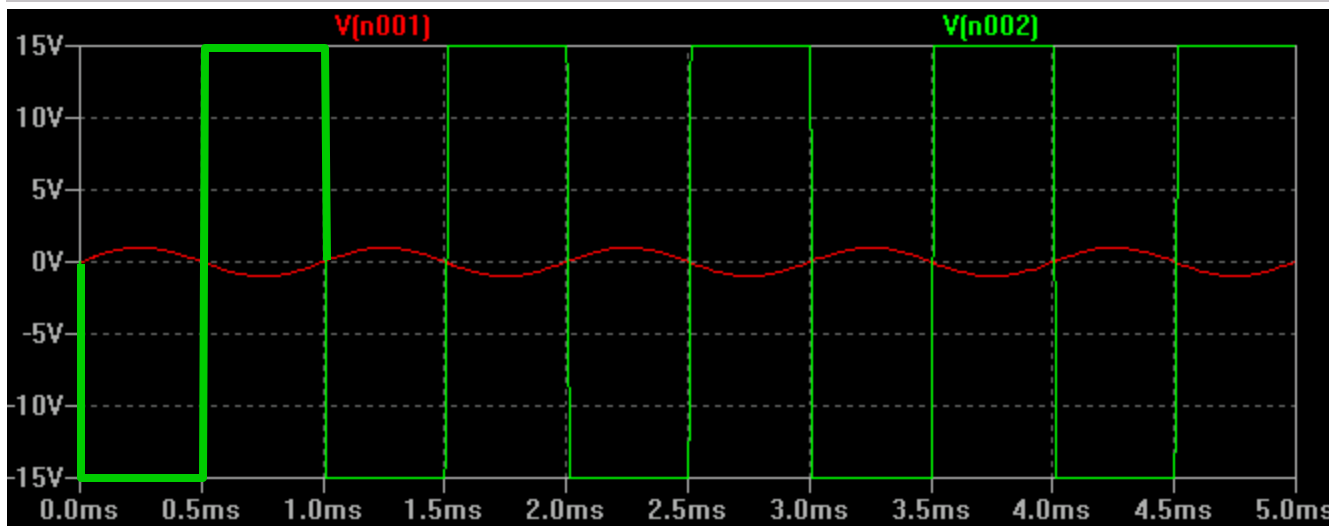
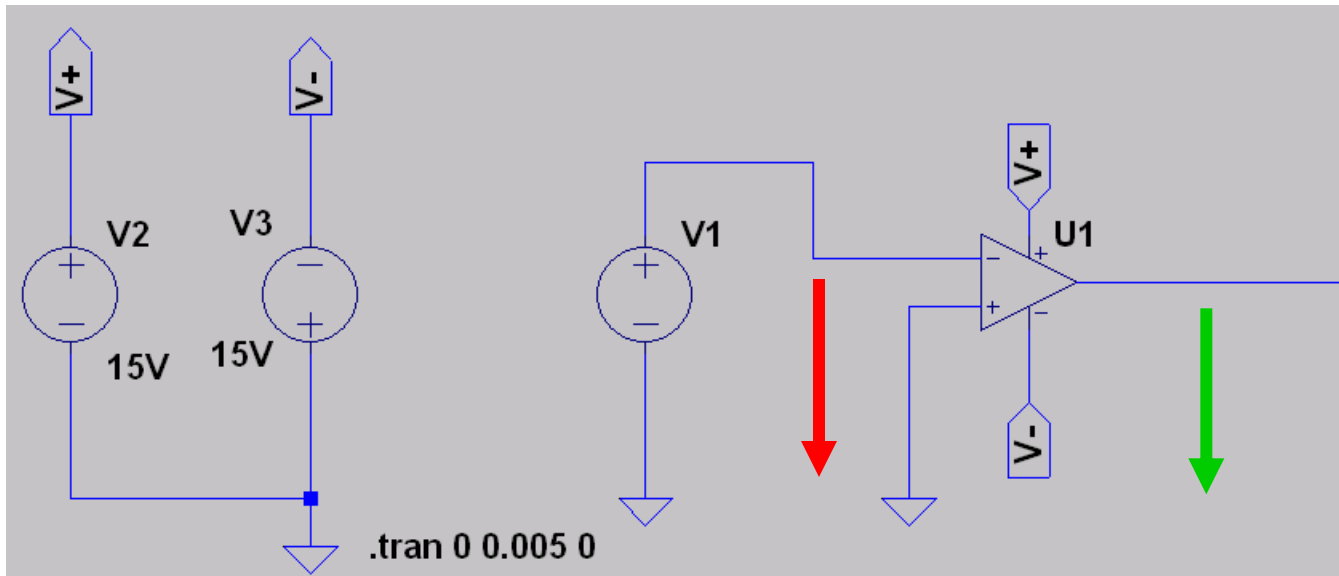
	idealer OpAmp	realer OpAmp
Verstärkung	∞	$10^5 \dots 10^7$
Ruhestrom (Eing.)	0	$0.1 \mu A \dots 100 nA$
Eingangswiderstand	∞	$10^6 \dots 10^{12} \Omega$
Ausgangswiderstand	0	$10 \Omega \dots 1 k\Omega$
max. Ausgangsstrom		<i>typ.</i> $\pm 20 mA$

Bei der Analyse von OpAmp-Schaltungen kann meist mit guter Näherung ein idealer OpAmp angenommen werden.

Simulation eines offen betriebenen OpAmps (nichtinvertierender Komparator)



Simulation eines offen betriebenen OpAmps (invertierender Komparator)

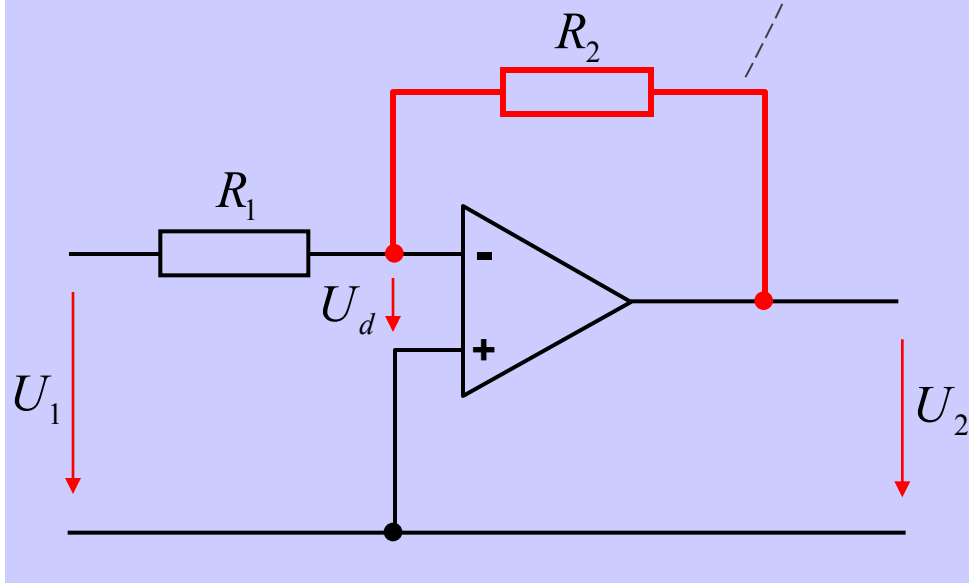


7.4 Gegenkopplung und ihre Wirkung

Meist wird der OpAmp so betrieben, dass ein Teil der Ausgangsspannung auf den **invertierenden** Eingang zurückgeführt wird.

Diese Schaltungsart wird als *Gegenkopplung* bezeichnet.

Beispiel: invertierender Verstärker



Wirkung:

Bereits kleinste Spannungen U_d (einige μV) würden wegen der hohen Verstärkung V_0 zu hohen Spannungen U_2 (einige V) führen.

Die Ausgangsspannung U_2 wirkt der Eingangsspannung U_d entgegen !

Konsequenz: Der Ausgang des OpAmp stellt sich gerade so ein, dass die Spannungsdifferenz U_d **auf (fast) 0V gehalten wird** (Regelkreis !).

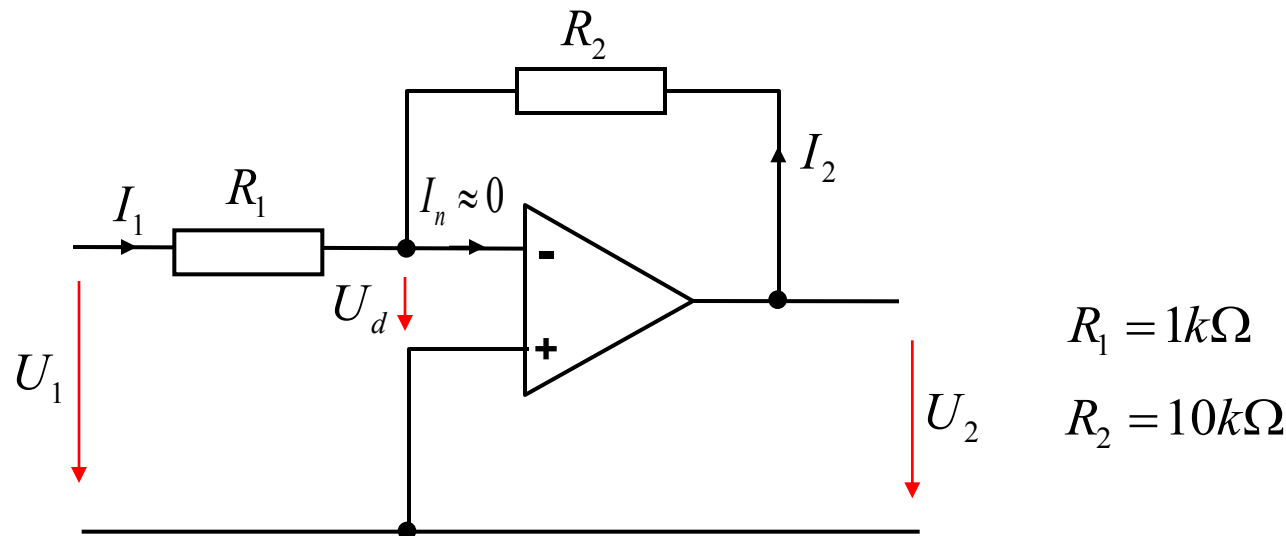
Herleitung: Gegenkopplung

Ein OpAmp habe die Verstärkung $V_0 = 10^5$.

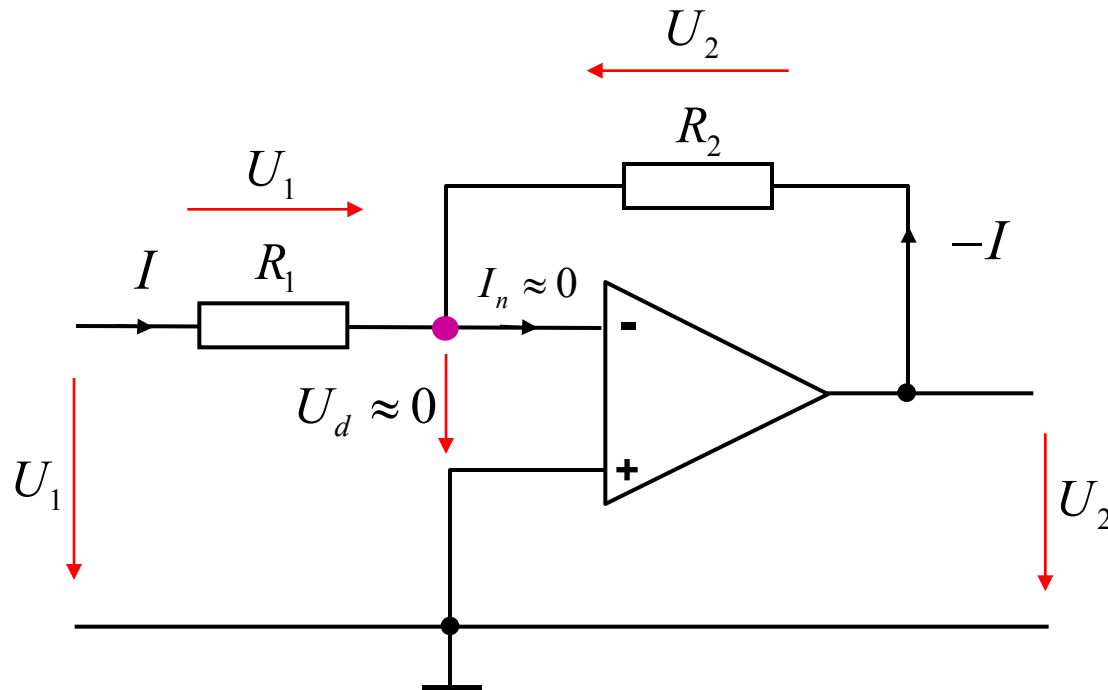
Der Eingangswiderstand des OpAmp kann als „unendlich hoch“ angenommen werden.

a) Geben Sie die Verstärkung $v = U_2 / U_1$ der u.a. Schaltung an.

b) Wie ist die Verstärkung der Schaltung für einen idealen Operationsverstärker $V_0 \rightarrow \infty$?



Zusammenfassung: idealer OpAmp in „Gegenkopplung“



- **virtuelle Masse**

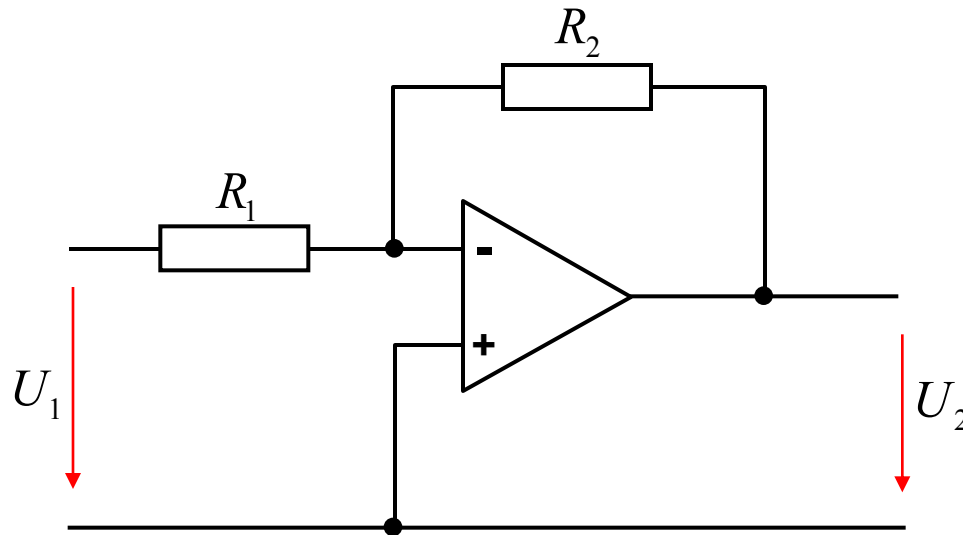
d.h. Potential wie Masse,
aber der Strom kann nicht
gegen Masse abfließen.

Durch die Gegenkopplung wird $U_d \approx 0$ erzwungen.

Für die Eingangsströme des Verstärkers gilt $I_n \approx 0$, $I_p \approx 0$.

7.5 Operationsverstärkerschaltungen

7.5.1 Invertierender Verstärker



$$V = \frac{U_2}{U_1} = -\frac{R_2}{R_1}$$

→ s. Tafelübung

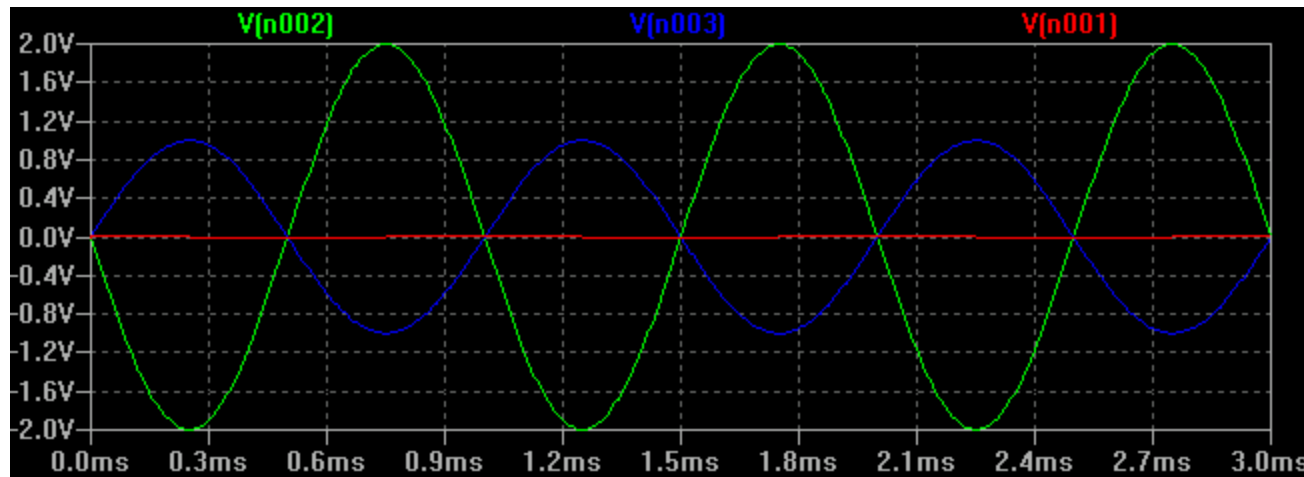
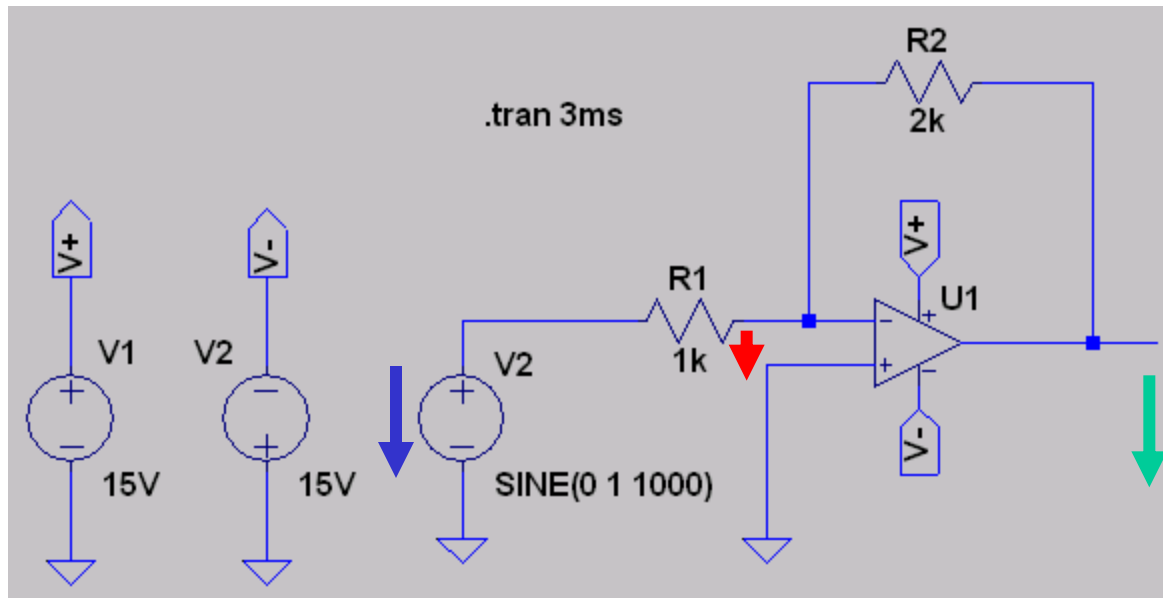
$$R_e \approx \rightarrow R_1$$

Durch die Gegenkopplung wird $U_2 = V \cdot U_1$ erzwungen.

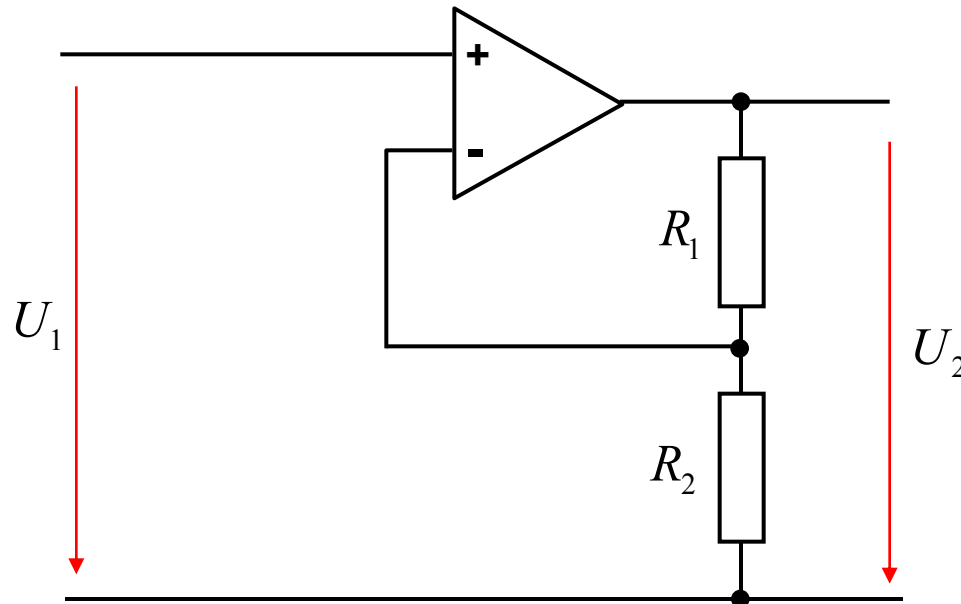
Auch eine Belastung des Ausgangs ($< I_{Max}$) ändert daran praktisch nichts. Der Ausgang verhält sich daher wie eine Spannungsquelle mit sehr niedrigem Innenwiderstand.

$$R_a \approx 0$$

Simulation eines „invertierenden Verstärkers“ mit $v=2$



7.5.2 Nichtinvertierender Verstärker



$$V = \frac{U_2}{U_1} = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

→ s. Tafelübung

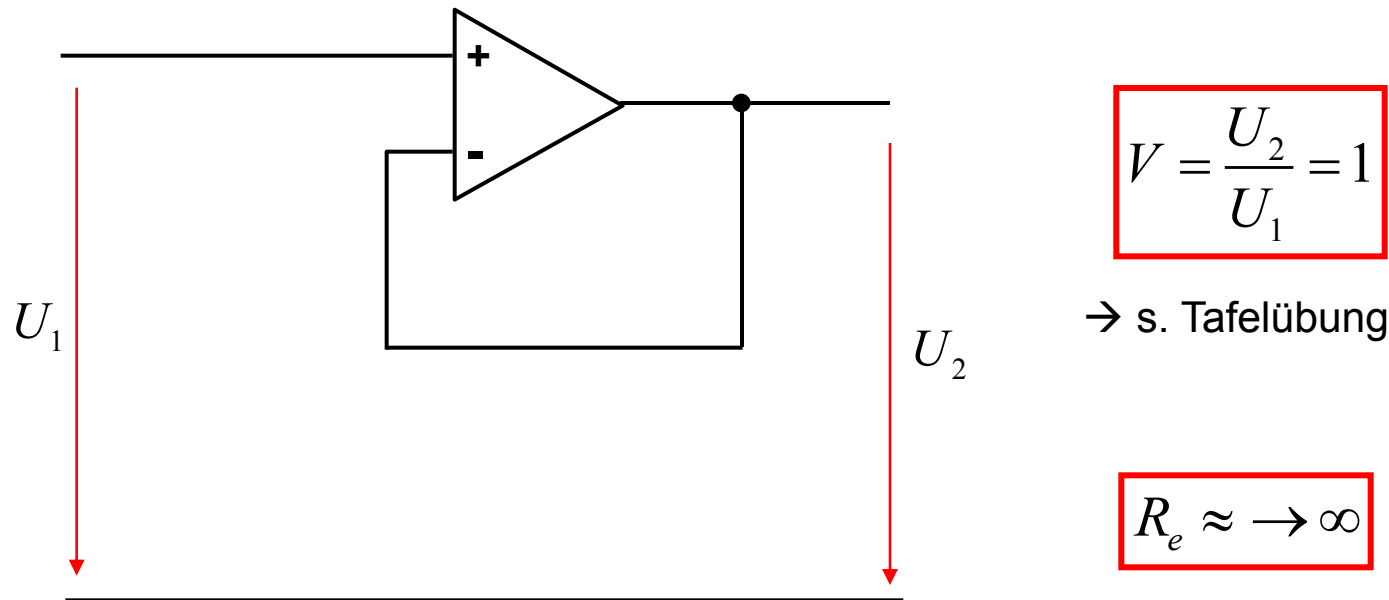
$$R_e \approx \rightarrow \infty$$

Durch die Gegenkopplung wird $U_2 = V \cdot U_1$ erzwungen.

Auch eine Belastung des Ausgangs ($< I_{Max}$) ändert daran praktisch nichts. Der Ausgang verhält sich daher wie eine Spannungsquelle mit sehr niedrigem Innenwiderstand.

$$R_a \approx 0$$

7.5.3 Impedanzwandler



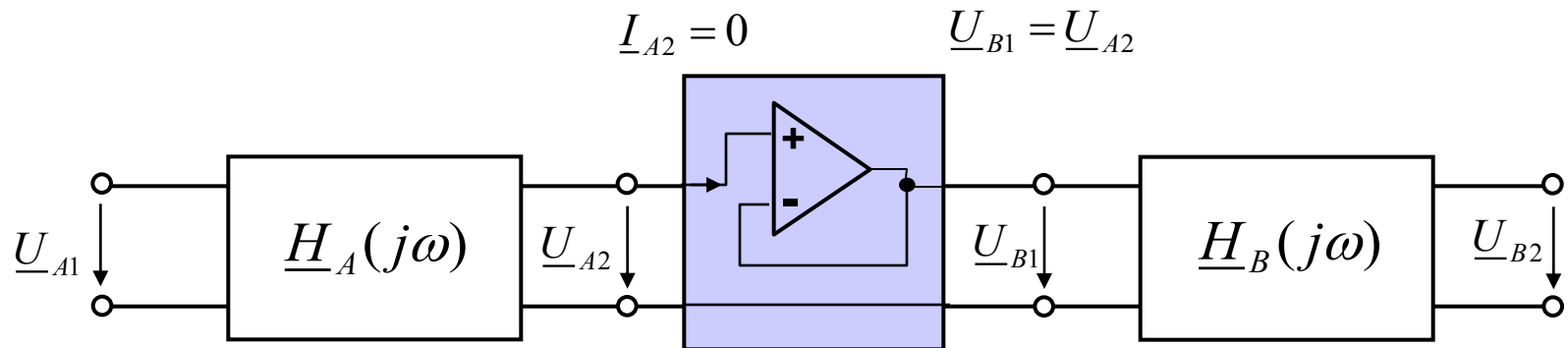
Durch die Gegenkopplung wird $U_2 = V \cdot U_1$ erzwungen.

Auch eine Belastung des Ausgangs ($< I_{Max}$) ändert daran praktisch nichts. Der Ausgang verhält sich daher wie eine Spannungsquelle mit sehr niedrigem Innenwiderstand.

$$R_a \approx 0$$

Beispielanwendung: Entkoppeln von Filterschaltungen

Für die Serienschaltung entkoppelter Vierpole gilt:

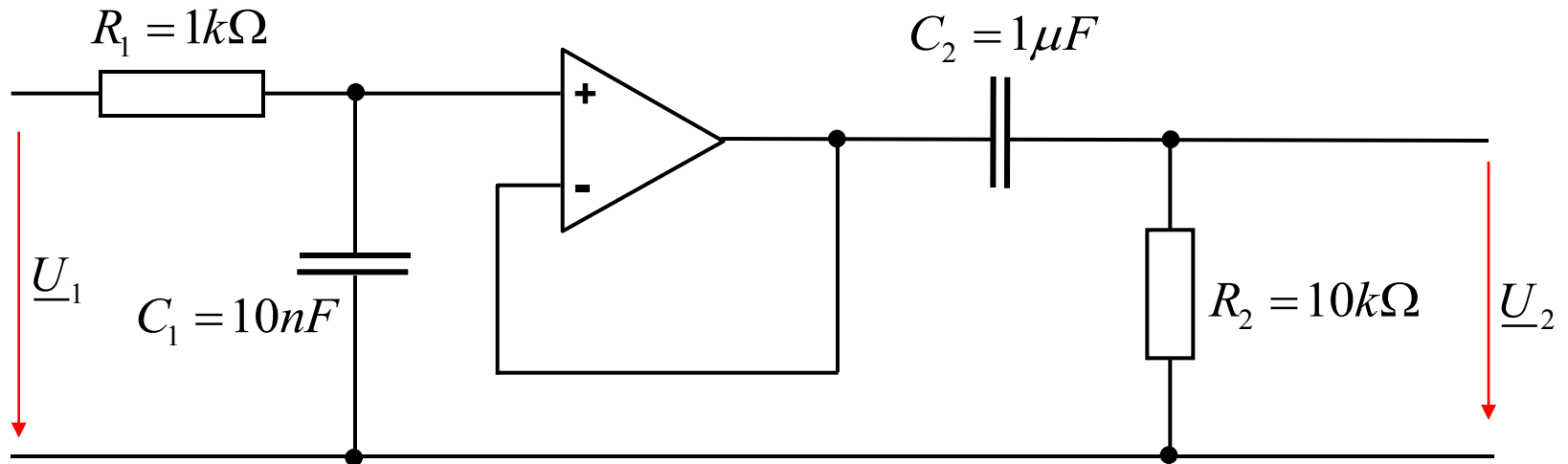


$$\underline{H}(j\omega) = \underline{H}_A(j\omega) \cdot \underline{H}_B(j\omega)$$

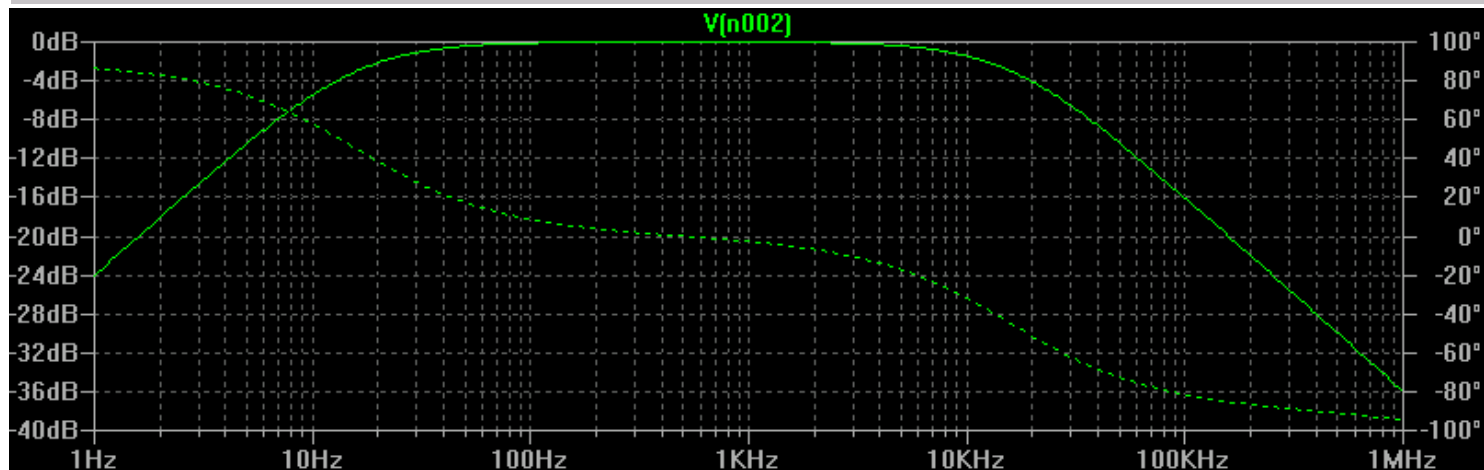
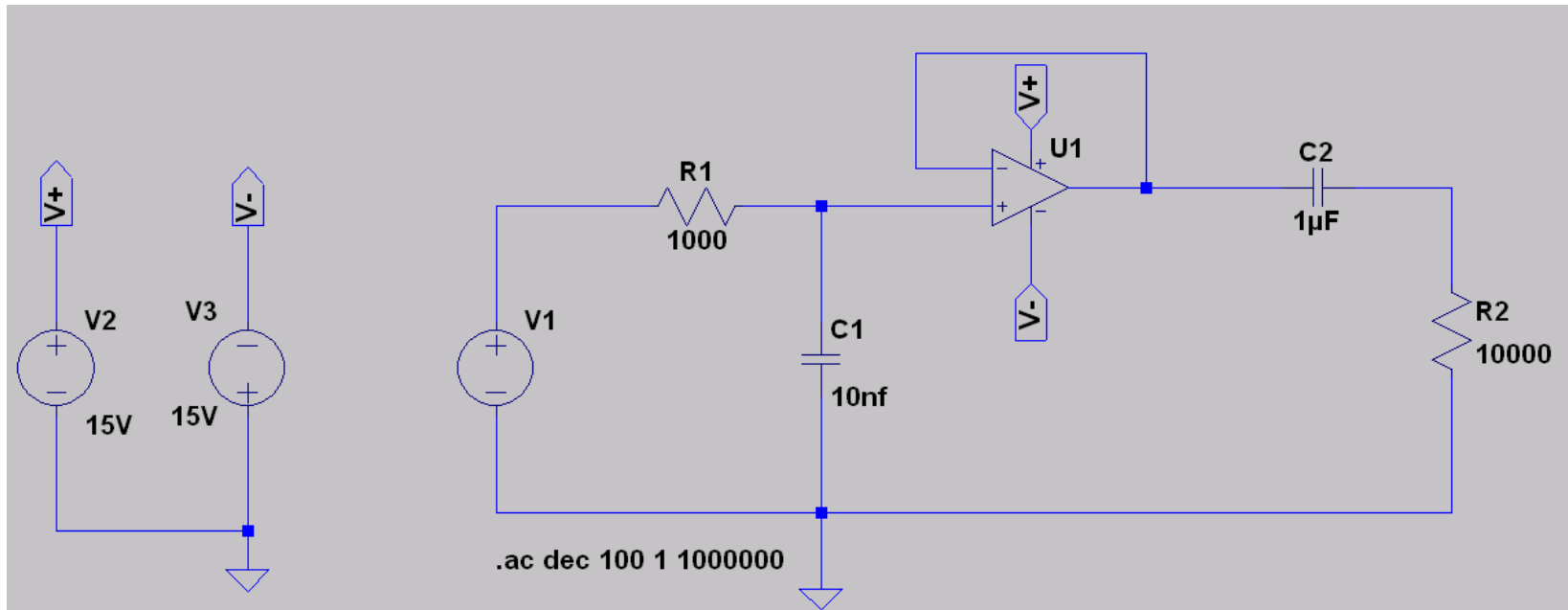
Entkoppelt bedeutet: Der Eingangswiderstand des Filters B belastet nicht das Filter A.

ÜBUNG: Serienschaltung entkoppelter Filterschaltungen (Bandpass)

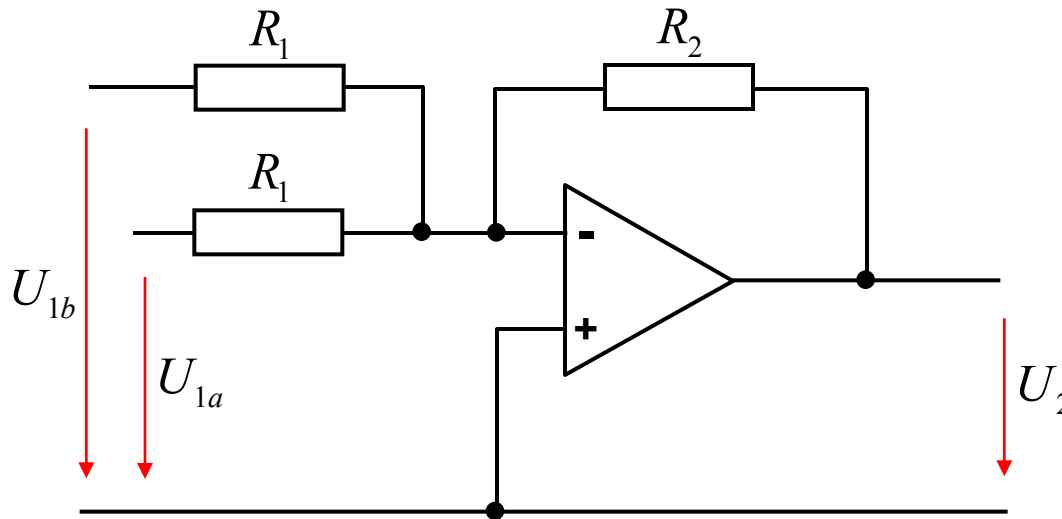
Geben Sie den Frequenzgang der folgenden Schaltung an:



Beispiel: Simulation des Bandpasses



7.5.4 (Invertierender) Addierer



$$U_2 = -\frac{R_2}{R_1} \cdot (U_{1a} + U_{1b})$$

→ s. Tafelübung

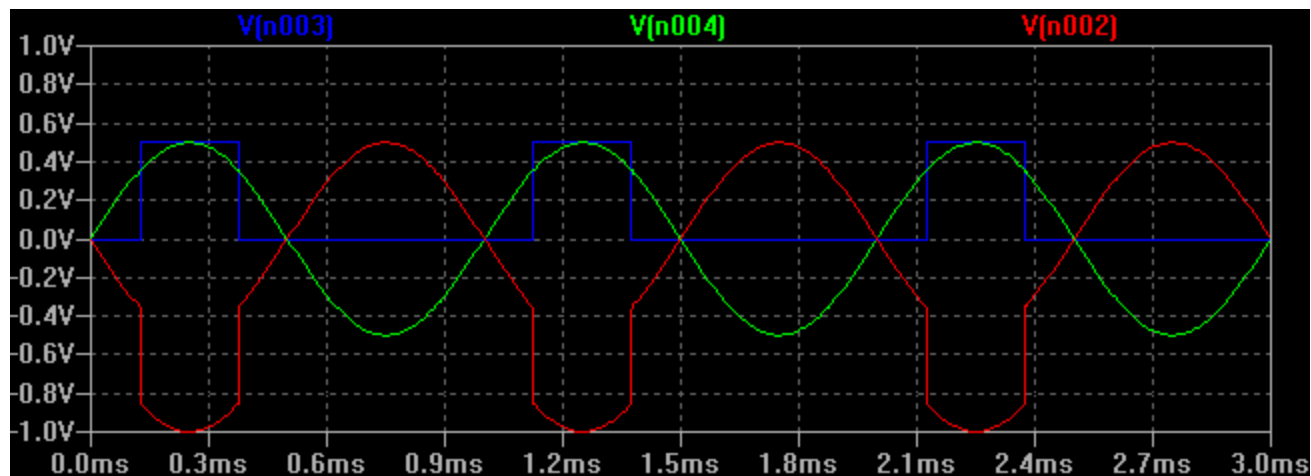
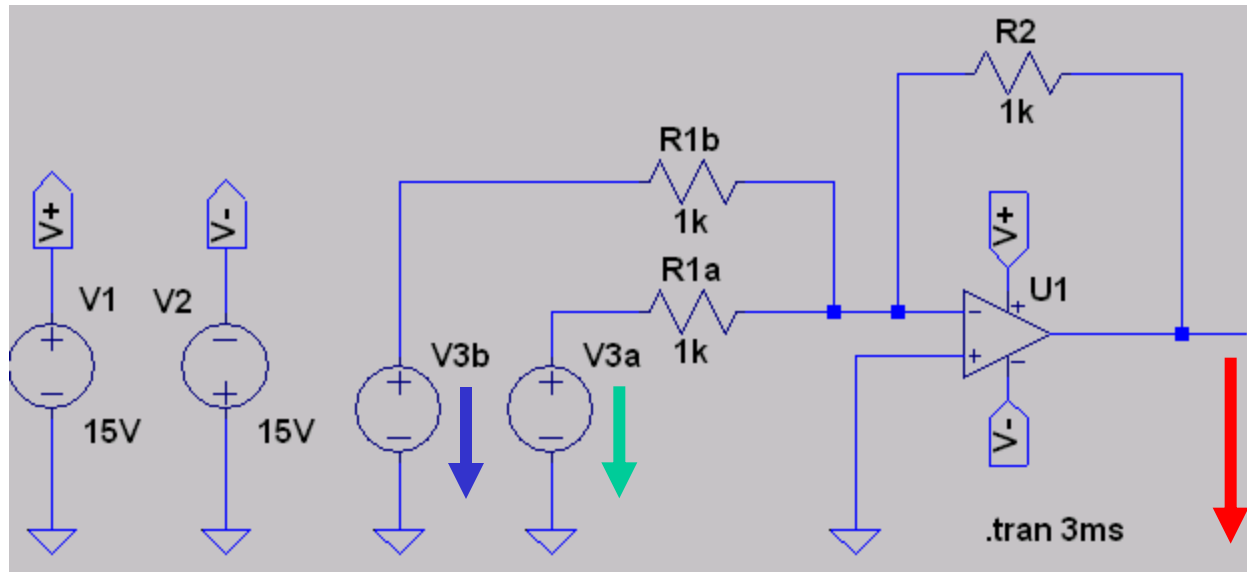
$$R_e = R_1$$

Durch die Gegenkopplung wird $U_2 = V \cdot (U_{1a} + U_{1b})$ erzwungen.

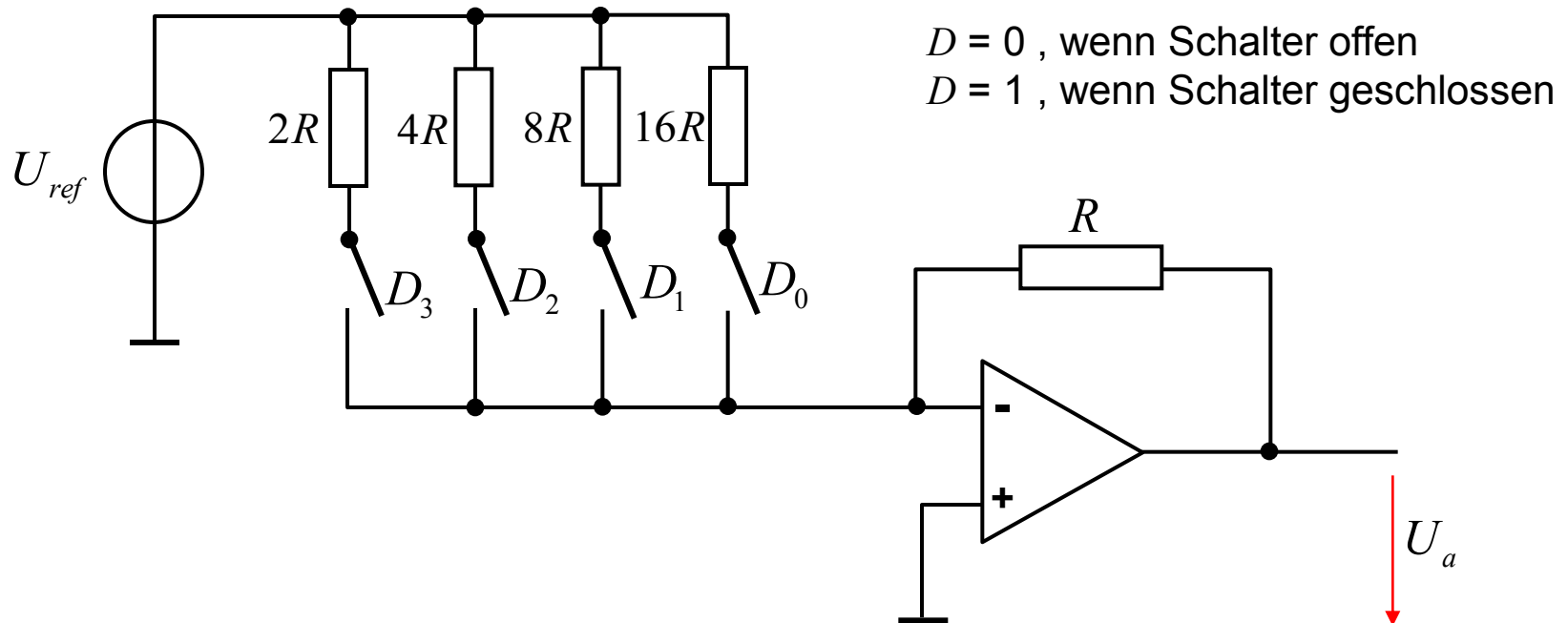
Auch eine Belastung des Ausgangs ($< I_{Max}$) ändert daran praktisch nichts. Der Ausgang verhält sich daher wie eine Spannungsquelle mit sehr niedrigem Innenwiderstand.

$$R_a \approx 0$$

Simulation eines „invertierenden Addierers“ mit $v=1$

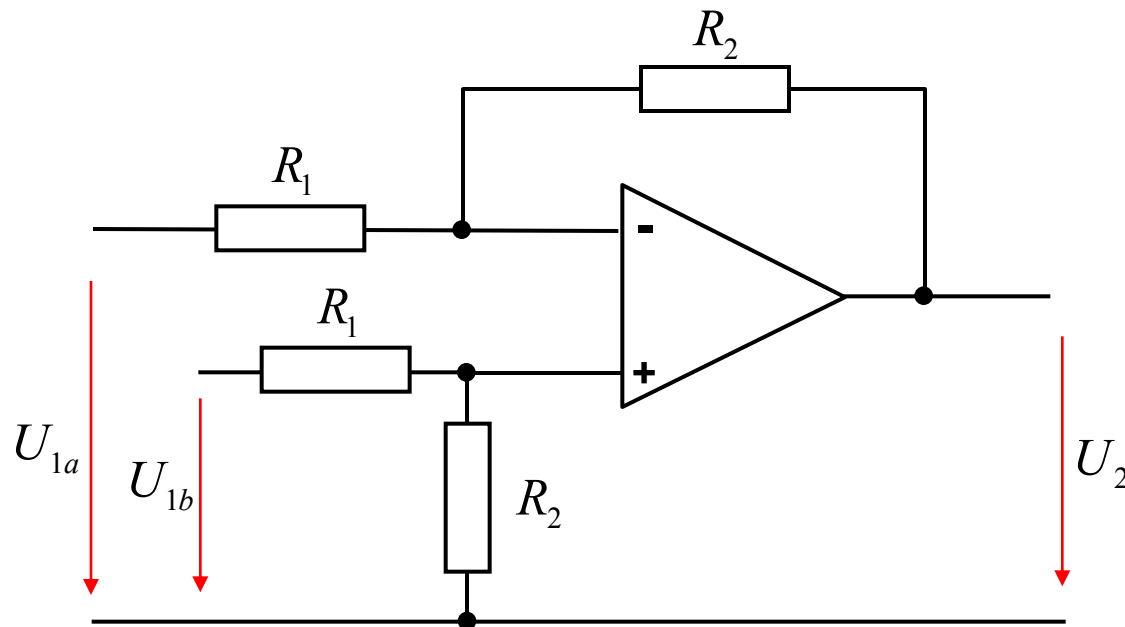


Anwendungsbeispiel: 4bit-DA-Wandler



$$U_a = -U_{ref} \cdot R \cdot \left(\frac{D_0}{16R} + \frac{D_1}{8R} + \frac{D_2}{4R} + \frac{D_3}{2R} \right)$$
$$= -U_{ref} \cdot \left(\frac{D_0}{16} + \frac{D_1}{8} + \frac{D_2}{4} + \frac{D_3}{2} \right)$$

7.5.5 Subtrahierer



$$U_2 = (U_{1b} - U_{1a}) \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

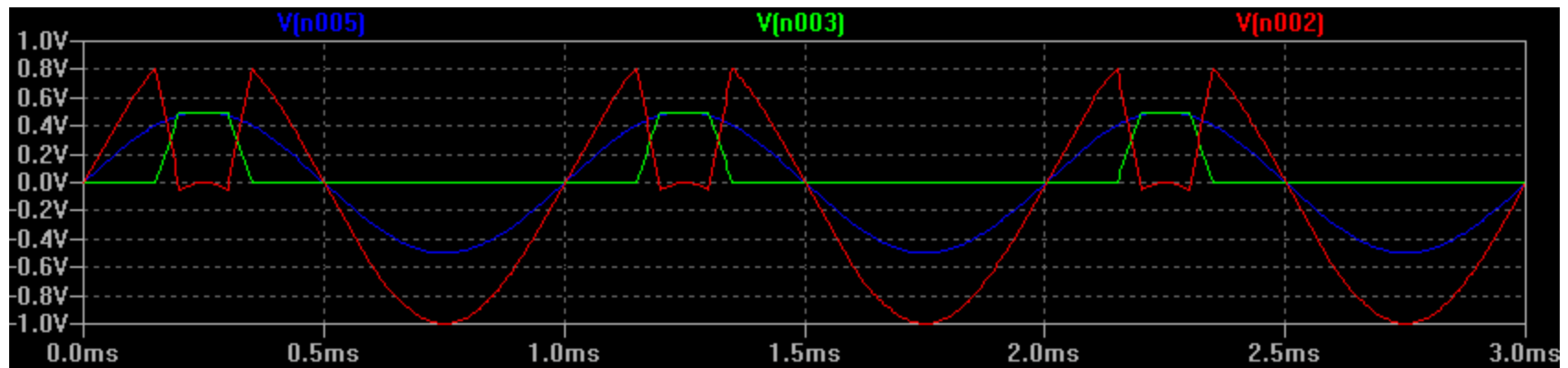
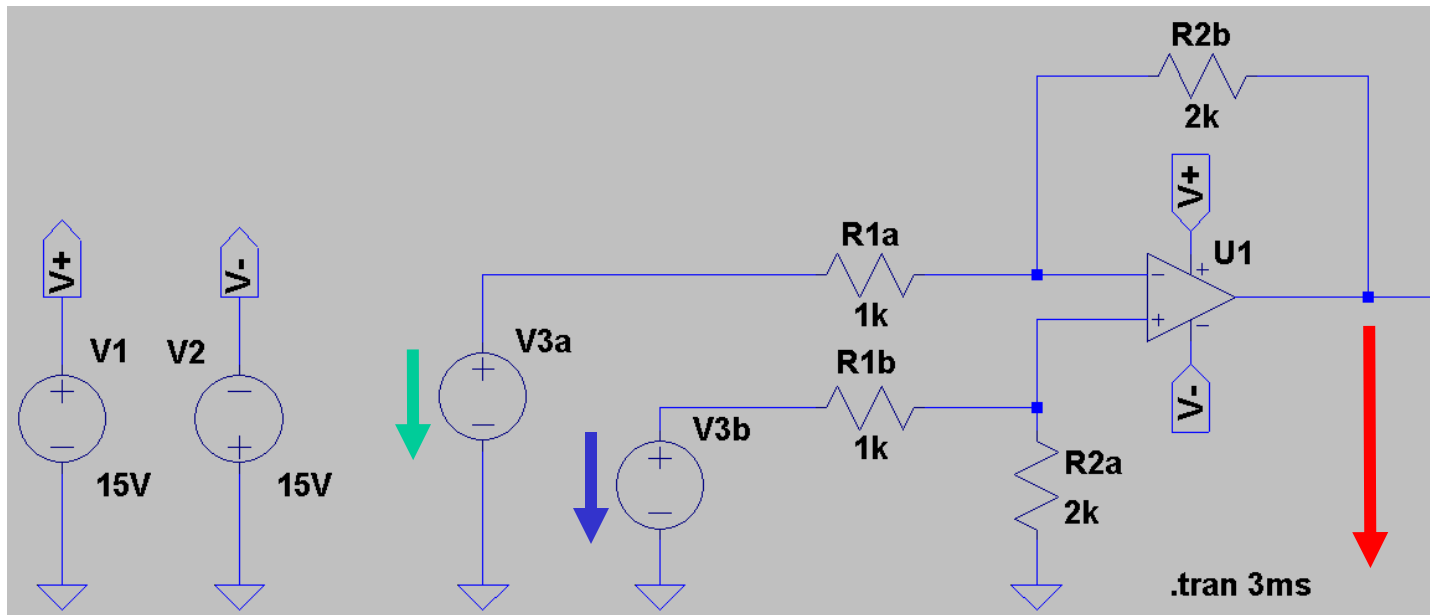
→ s. Tafelübung

Durch die Gegenkopplung wird $U_2 = V \cdot (U_{1b} - U_{1a})$ erzwungen.

Auch eine Belastung des Ausgangs ($< I_{Max}$) ändert daran praktisch nichts. Der Ausgang verhält sich daher wie eine Spannungsquelle mit sehr niedrigem Innenwiderstand.

$$R_a \approx 0$$

Simulation eines Subtrahierers mit $v=2$





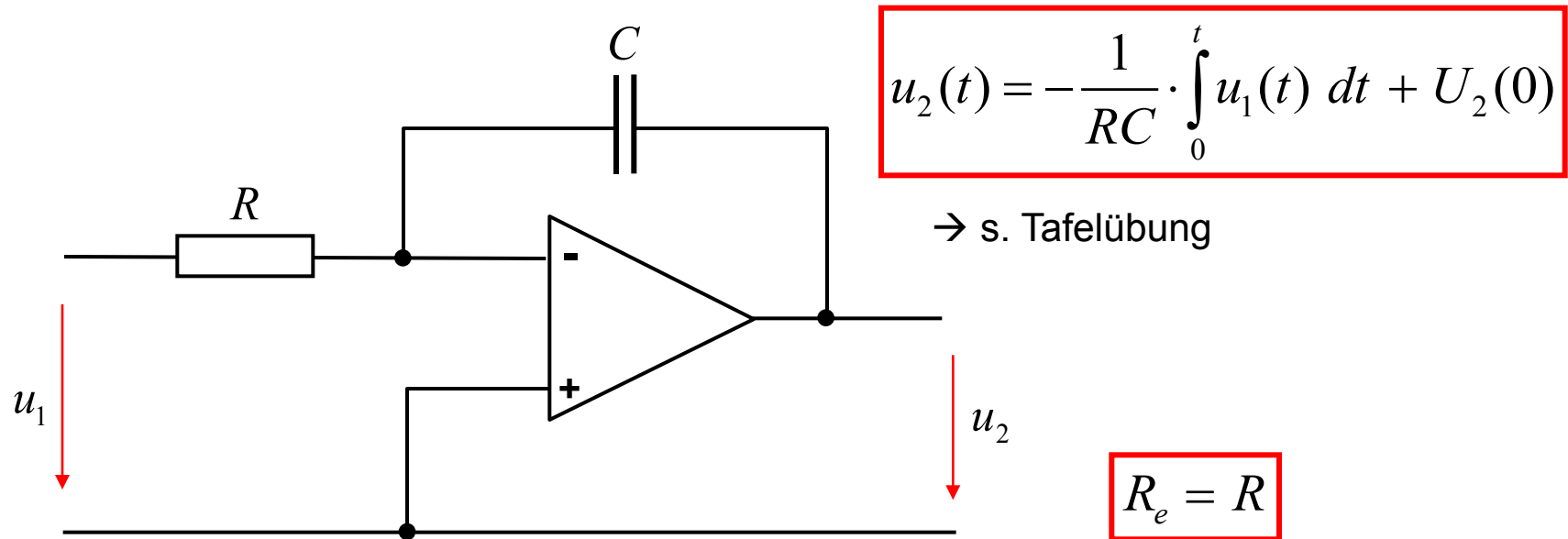
ÜBUNG: Pegelwandler

Ein Messsignal liegt im Spannungsbereich zwischen $-3V \dots -1V$.

Das Signal soll durch eine Schaltung auf den Spannungsbereich eines AD-Wandlers ($0V \dots 10V$) angepasst werden (nichtinvertierend).

Eine geeignete Schaltung ist zu entwerfen.

7.5.6 (Invertierender) Integrator



Durch die Gegenkopplung wird U_2 erzwungen.

Auch eine Belastung des Ausgangs ($< I_{Max}$) ändert daran praktisch nichts. Der Ausgang verhält sich daher wie eine Spannungsquelle mit sehr niedrigem Innenwiderstand.

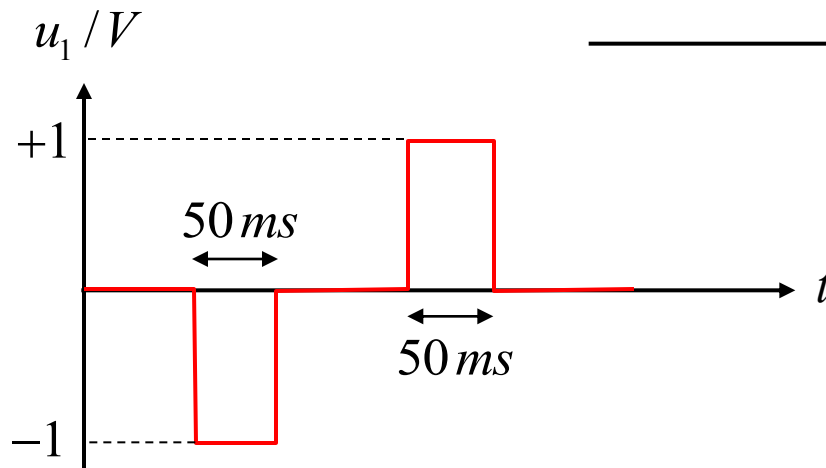
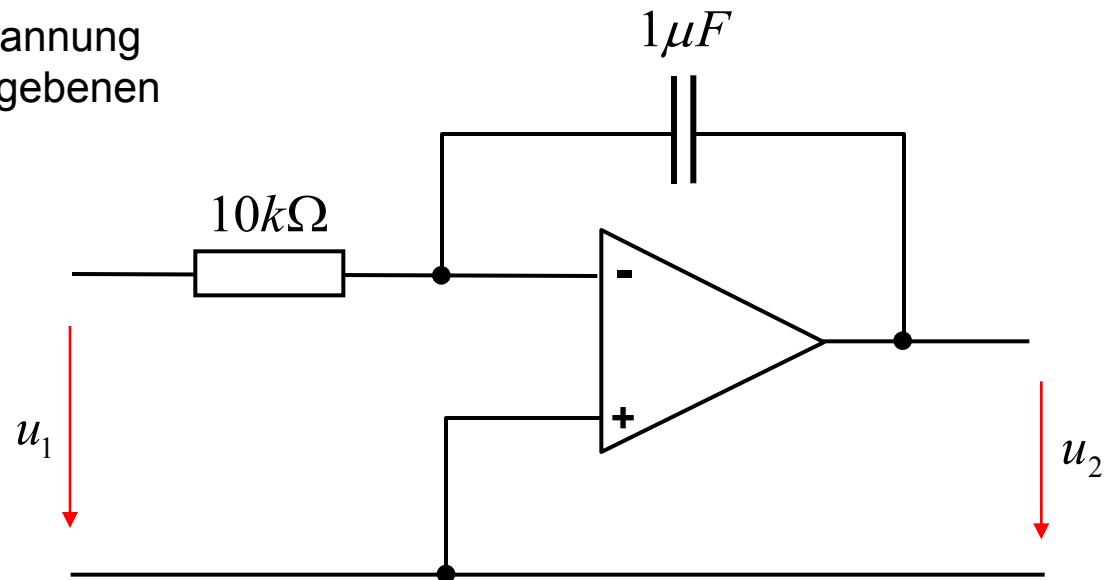
$$R_a \approx 0$$

ÜBUNG: Integrator

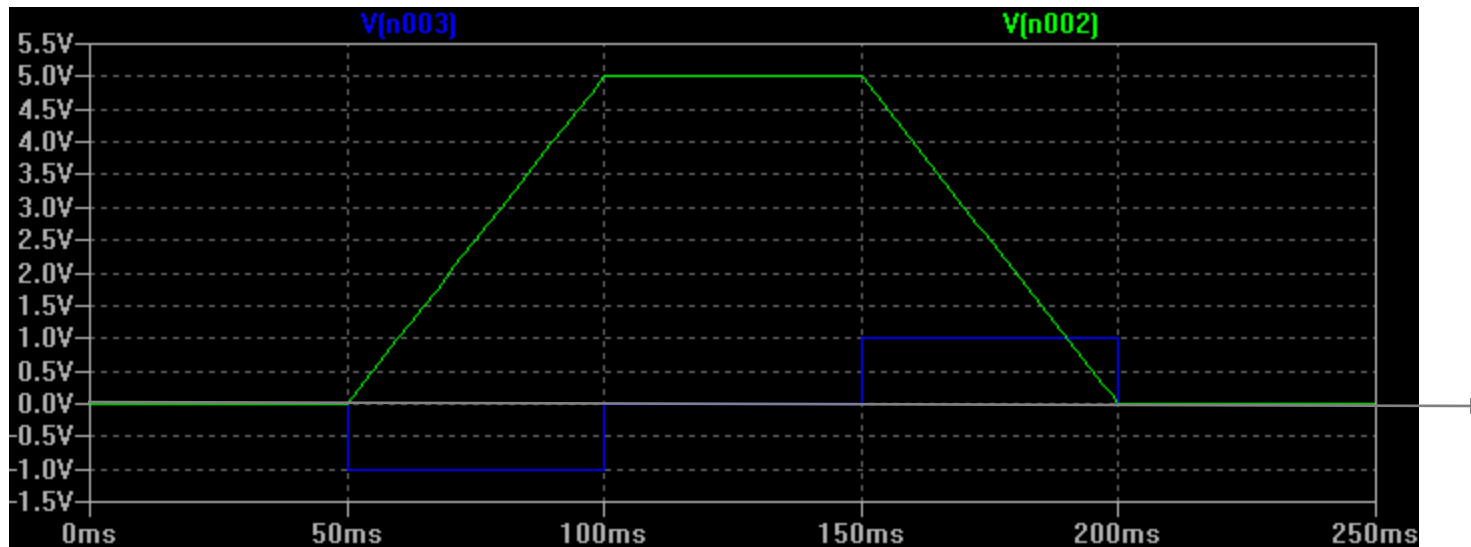
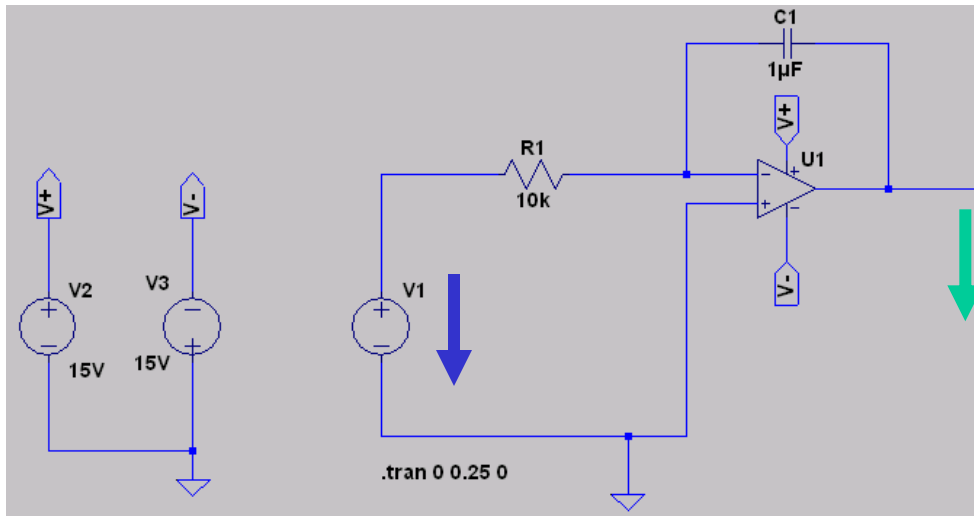
Wie verläuft die Ausgangsspannung des Integrators bei der angegebenen Eingangsspannung?

Anm.: idealer OpAmp

$$U_2(0) = 0V$$



Simulation eines „invertierenden Integrators“ mit $1/RC = 100 \text{ s}^{-1}$

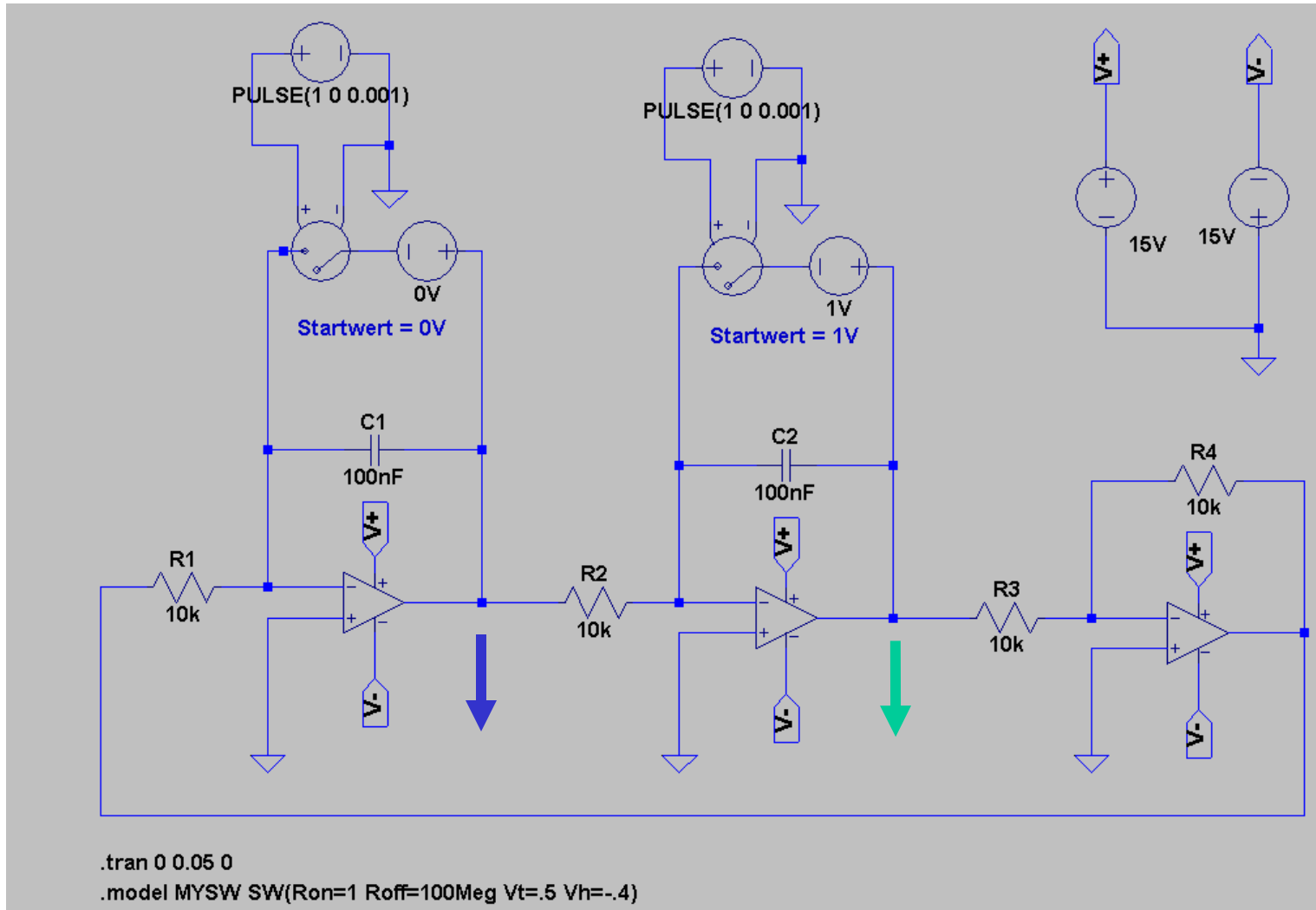




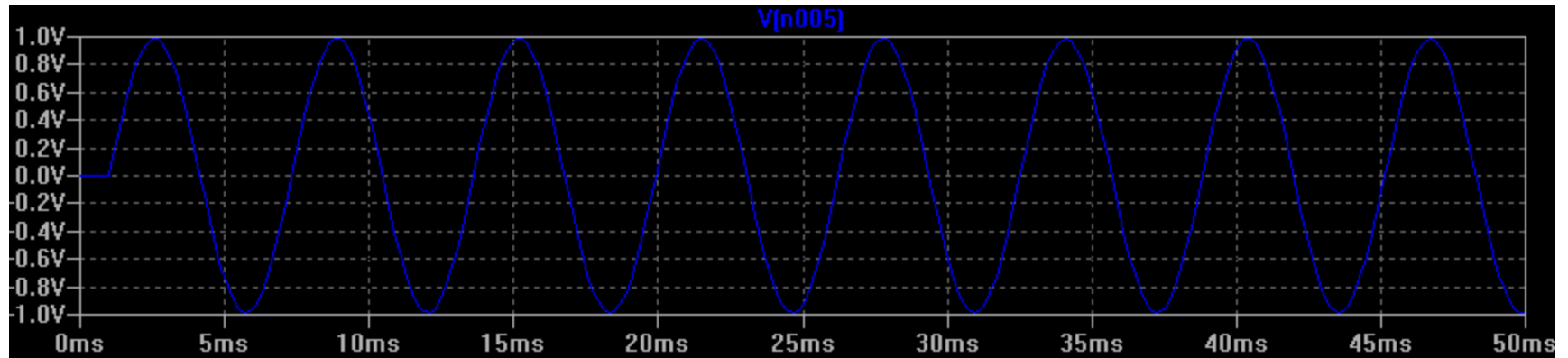
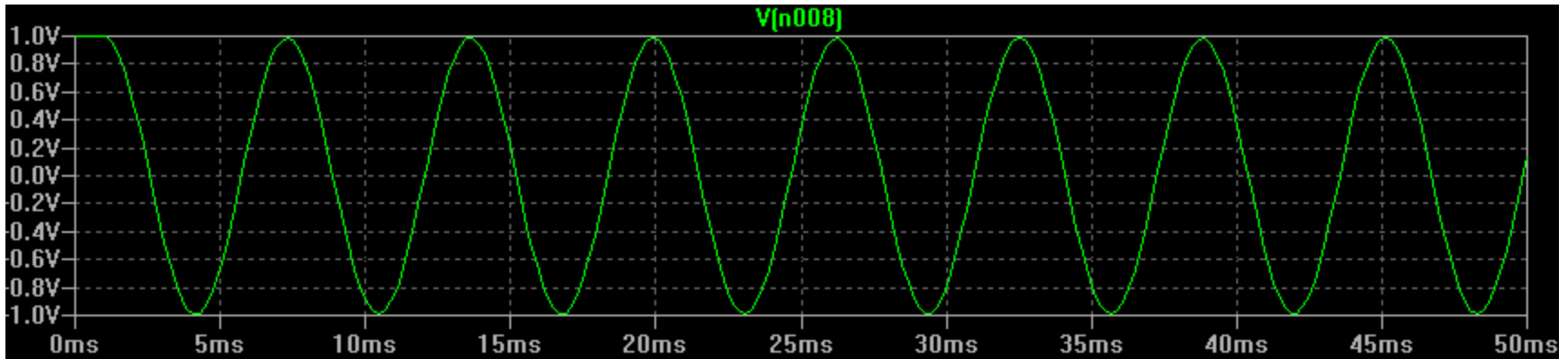
ÜBUNG: Sinusgenerator mit Integratoren

- a) Beschreiben Sie die cos-Funktion $u(t) = 1V \cdot \cos(\omega t)$ als Differentialgleichung.
- b) Die Differentialgleichung ist als Rechenschaltung mit Integratoren zu realisieren.

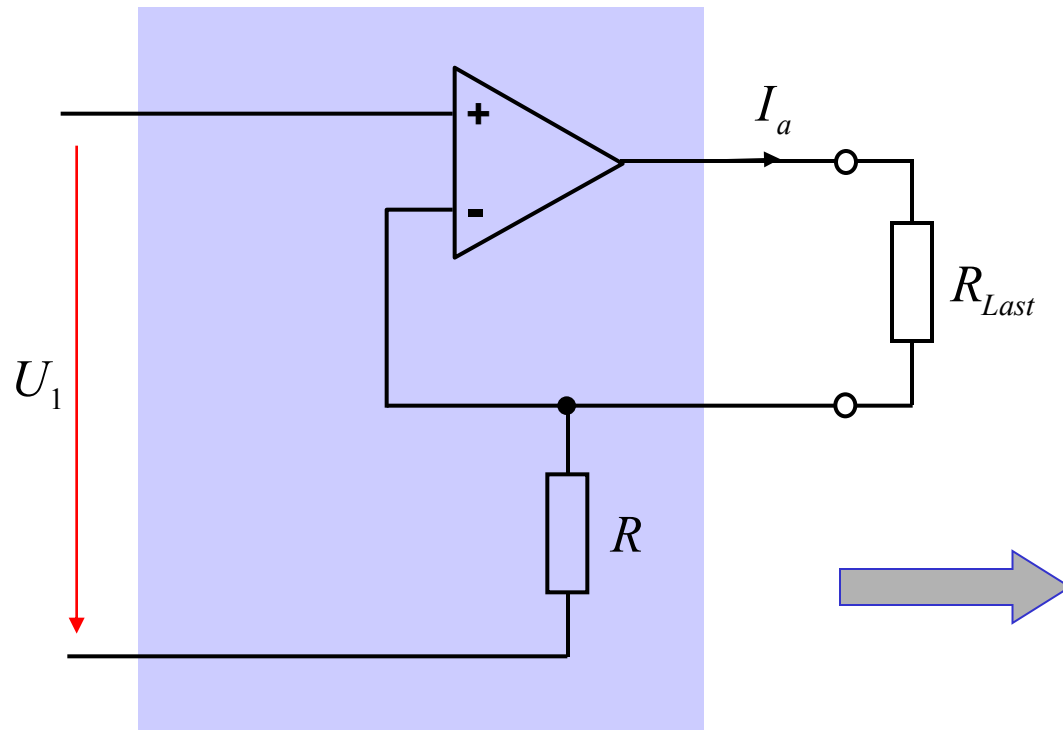
Simulation eines Sinusgenerators mit Integratoren



Ergebnis der Rechenschaltung

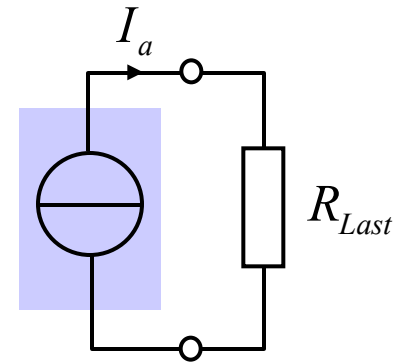


7.5.7 Spannungsgesteuerte Stromquelle



$$I_a = \frac{U_1}{R}$$

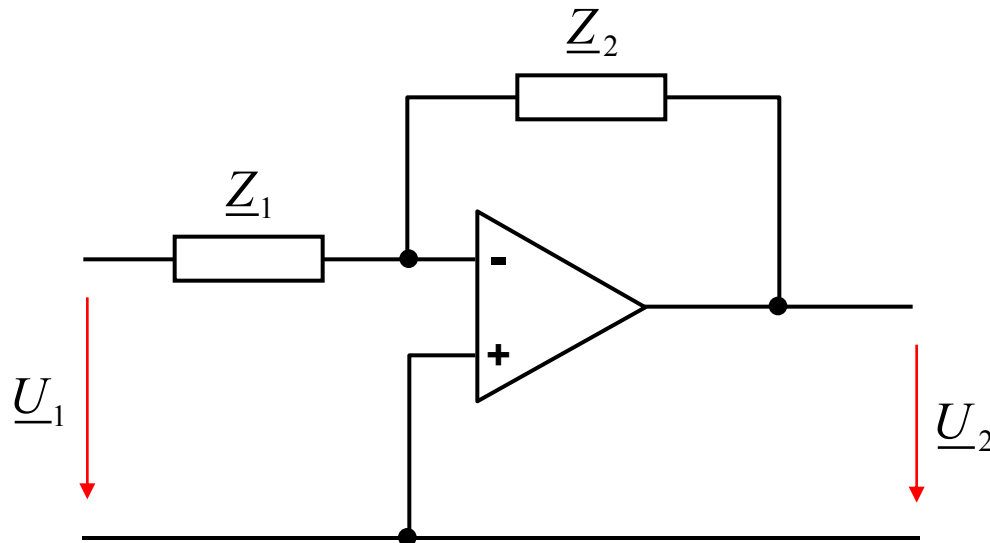
→ s. Tafelübung



Der Strom I_a ist vom Lastwiderstand R_{Last} unabhängig.

→ steuerbare Konstantstromquelle

7.5.8 Frequenzgang von OpAmp-Filterschaltungen 1



$$\underline{H}(j\omega) = \frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = -\frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1}$$

→ s. Tafelübung

$$\underline{Z}_e \approx \rightarrow \underline{Z}_1$$

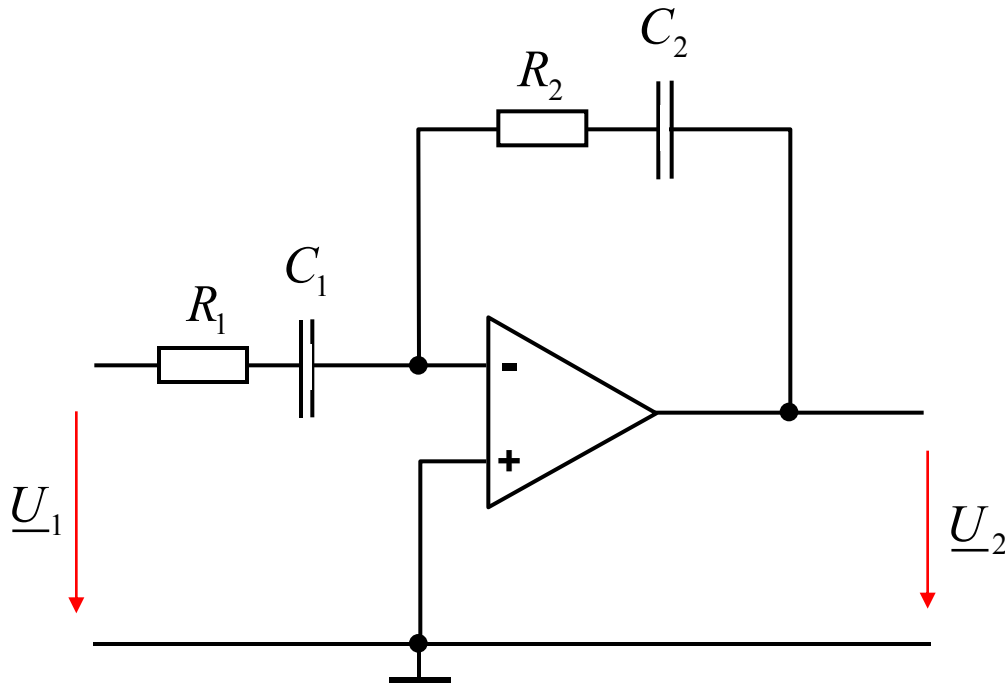
Durch die Gegenkopplung wird $\underline{U}_2 = \underline{H} \cdot \underline{U}_1$ erzwungen.

Auch eine Belastung des Ausgangs ($< I_{Max}$) ändert daran praktisch nichts. Der Ausgang verhält sich daher wie eine Spannungsquelle mit sehr niedrigem Innenwiderstand.

$$R_a \approx 0$$

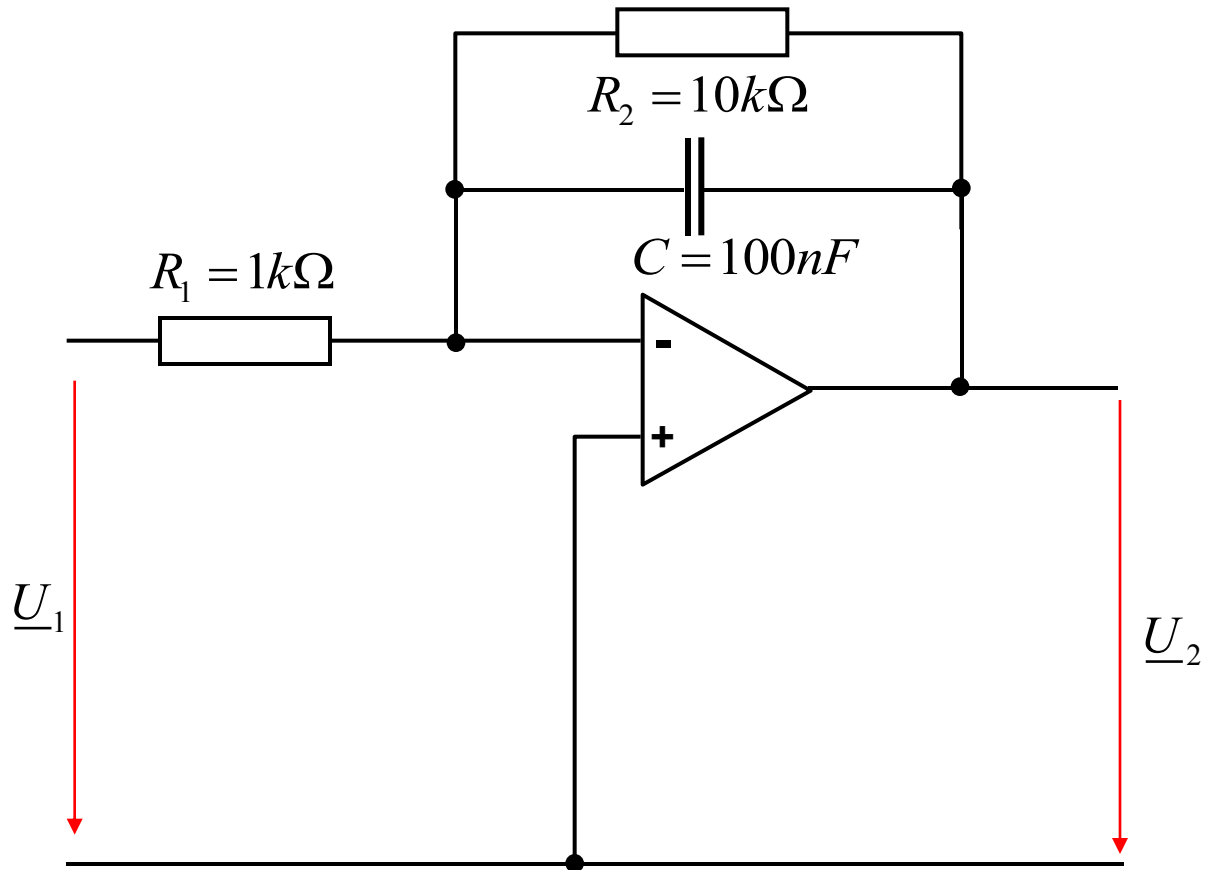
ÜBUNG: Frequenzgang von OpAmp-Filterschaltungen 1

Der Frequenzgang ist zu berechnen:



ÜBUNG: Frequenzgang von OpAmp-Filterschaltungen 2

Der Frequenzgang ist zu berechnen:



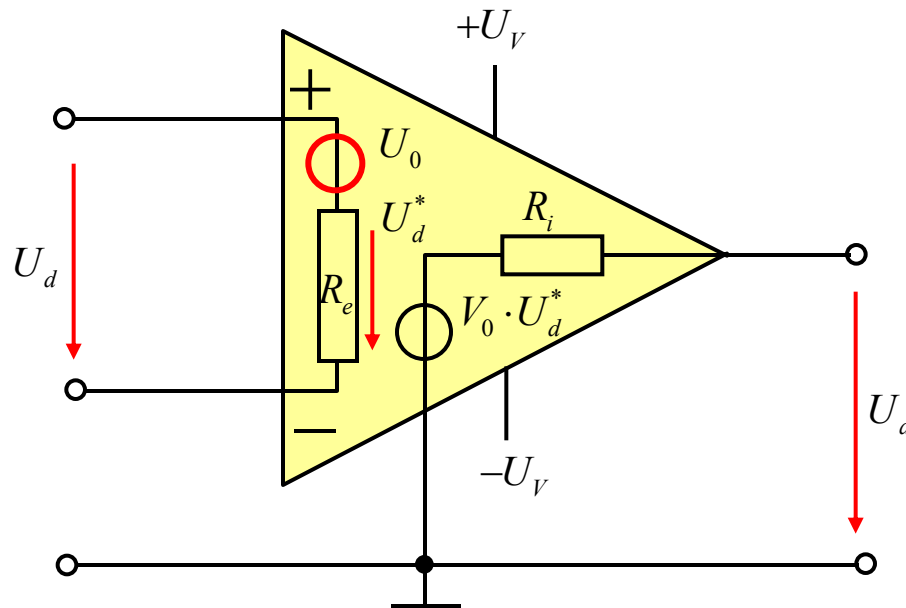
7.6 Nichtideales Verhalten von realen OpAmps (einige Beispiele)

7.6.1 Offsetspannung

Bei der Eingangsspannung $U_d=0$ ist die Ausgangsspannung im Allg. $U_a \neq 0V$.

Um die Ausgangsspannung auf 0V zu bringen, müsste man eine kleine Eingangsspannung U_0 am Eingang anlegen. Die Spannung wird *Offsetspannung* genannt.

Offsetspannung: typ. $10\mu V - 1mV$



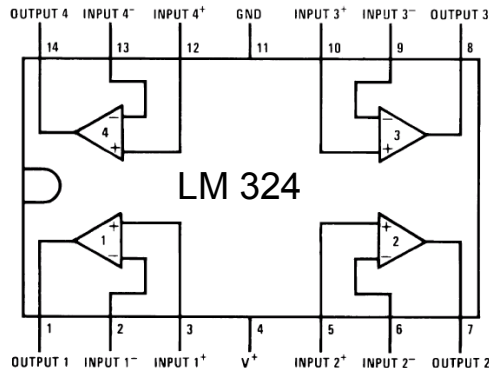
7.6.2 Frequenzabhängigkeit der Verstärkung

Die Verstärkung des ohne Gegenkopplung betriebenen OpAmps ist stark von der Frequenz abhängig.

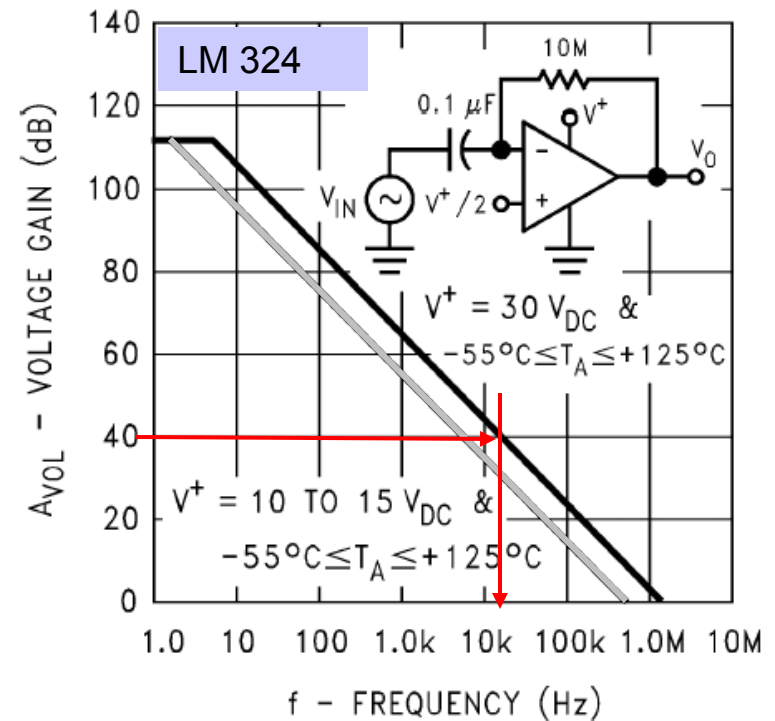
Beim u.a. OpAmp (LM324) ist beträgt die Verstärkung bei 1Mhz nur noch 1 (0dB).

Dimensionierungsbeispiel mit dem LM 324:

Ein invert. Verstärker mit einer Verstärkung 100 (40dB) hätte einen lin.Frequenzgang bis etwa 10 kHz.



Open Loop Frequency Response



7.6.3 Impuls-Anstiegsgeschwindigkeit (Slew Rate)

Die Ausgangsspannung kann einem Eingangssprung nicht beliebig schnell folgen. Stattdessen steigt die Ausgangsspannung rampenförmig.

Die Steilheit (in $V/\mu s$) wird als *Slew-Rate* bezeichnet.

Beim OpAmp (LM324) beträgt die Slew-Rate etwa $0.5 V/\mu s$.

Slew-Rate: typ. $0.5 V/\mu s$ $100 V/\mu s$

