

# Praktikum 2

Johanna Repp  
Tilman Loos

June 4, 2025

## Contents

<b>1</b>	<b>Vorbereitung</b>	<b>2</b>
1.1	Invertierender Operationsverstärker . . . . .	2
1.1.1	a) . . . . .	2
1.1.2	b) . . . . .	3
1.1.3	c) . . . . .	3
1.1.4	d) . . . . .	5
1.2	Nichtinvertierender Operationsverstärker . . . . .	7
1.2.1	a) . . . . .	7
1.2.2	b) . . . . .	8
1.2.3	c) . . . . .	8
1.2.4	d) . . . . .	9
1.2.5	e) . . . . .	9
1.2.6	f) . . . . .	10
1.2.7	g) . . . . .	11
1.2.8	h) . . . . .	12
1.3	Hochohmige Spannungsquelle . . . . .	12
1.3.1	a) . . . . .	12
1.3.2	b) . . . . .	13
1.4	Differentiator und Integrator . . . . .	13

# 1 Vorbereitung

## 1.1 Invertierender Operationsverstärker

### 1.1.1 a)

Kenngrößen eines idealen OPVs:

- $U_d = 0 \text{ V}$
- $r_e \rightarrow \infty$
- $r_a \rightarrow \infty$
- $A \rightarrow \infty$ , hier allerdings als endlich angenommen.

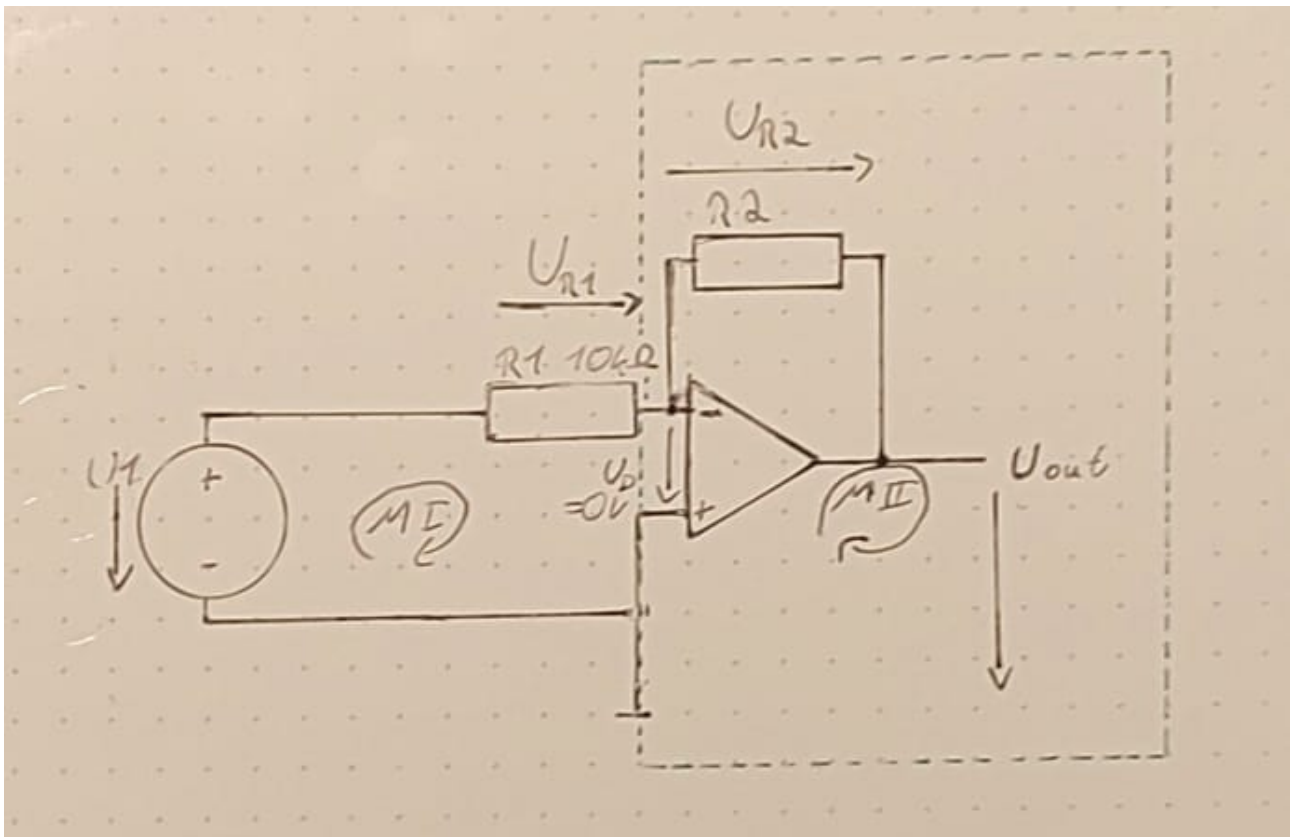


Figure 1: Der gegebene Schaltplan mit Spannungspfeilen und Maschen

Über Maschen:

M1:

$$-U_{ein} + U_{R1} + U_D = 0$$

$$\Rightarrow -U_{ein} + R_1 \cdot I_1 + U_D = 0$$

$$\Leftrightarrow U_{ein} = R_1 \cdot I_1 + 0 \text{ V}$$

$$\Rightarrow U_{ein} = R_1 \cdot I_1$$

$$\Leftrightarrow I_1 = \frac{U_{ein}}{R_1}$$

M2:

$$-U_{aus} - U_{R_2} + U_D = 0$$

$$\implies -U_{aus} - R_2 \cdot I_2 + U_D = 0$$

$$\Leftrightarrow U_{aus} = -R_2 \cdot I_2 + 0 \text{ V}$$

$$\implies U_{aus} = -R_2 \cdot I_2$$

$$\Leftrightarrow I_2 = -\frac{U_{aus}}{R_2}$$

Ein idealer OPV hat einen unendlich großen Eingangswiderstand  $r_e$ , weshalb kein Strom in den Eingang fließen kann. Daraus folgt  $I_1 = I_2$ :

$$I_1 = I_2 \implies \frac{U_{ein}}{R_1} = -\frac{U_{aus}}{R_2} \Leftrightarrow \frac{U_{aus}}{U_{ein}} = -\frac{R_2}{R_1} = A_D$$

Wenn man die endliche Verstärkung  $A_D$  berücksichtigt:

$$U_{out} = A_D \cdot U_{OS} = A_D \cdot (U_{i+} - U_{i-})$$

$$\Leftrightarrow U_{aus} = -A_D \cdot U_{i-}$$

$$\Leftrightarrow U_{i-} = U_1 + (U_{aus} - U_1) \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$\Leftrightarrow U_{aus} = -A_D \cdot (U_1 + (U_{out} - U_1) \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2})$$

$$\Leftrightarrow U_{aus} = -A_D \cdot U_1 (1 - \frac{R_1}{R_1 + R_2}) - A_D \cdot U_1 \cdot (1 - \frac{R_1}{R_1 + R_2})$$

$$\Leftrightarrow U_{aus} (1 + A_D \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}) = -A_D \cdot U_1 \cdot (1 - \frac{R_1}{R_1 + R_2})$$

$$\frac{U_{aus}}{U_1} = -\frac{A_D \cdot (1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2})}{1 + A_D \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}}$$

$$= \frac{R_1 A_D + R_2 A_D - R_1 A_D}{R_1 + R_2 + R_1 A_D}$$

$$= \frac{R_2}{\frac{R_1 + R_2}{A_D} + R_1}$$

### 1.1.2 b)

$$r_e = \frac{u_{ein}}{i_{R_1}} = \frac{u_{ein}}{\frac{u_{ein}}{R_1}} = R_1$$

### 1.1.3 c)

Sollwerte:

- $A_{D0} = -4$
- $A_D = \infty$
- Aus Schaltung:  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$
- Toleranz:  $\pm 1\%$

Berechnung:

$$A_{D0} = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$\Leftrightarrow R_2 = -A \cdot R_1$$

$$\Leftrightarrow R_2 = -(-4) \cdot 10 \text{ k}\Omega = 40 \text{ k}\Omega$$

$$\frac{U_{out}}{U_1} = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$\Leftrightarrow R_2 = -\frac{U_{out}}{U_1} \cdot R_1 = 4R_1 = 4 \cdot 10 \text{ k}\Omega = 40 \text{ k}\Omega$$

Widerstand aus der E12-Reihe:  $39 \text{ k}\Omega$ , da der nächst höchste  $7 \text{ k}\Omega$  größer als errechnet wäre.

Worst-Case-Betrachtung:

Bei  $R_{min}$ :

$$39 \text{ k}\Omega \cdot 0,99 = 38,61 \text{ k}\Omega$$

$$10 \text{ k}\Omega \cdot 0,99 = 9,9 \text{ k}\Omega$$

Bei  $R_{max}$ :

$$39 \text{ k}\Omega \cdot 1,01 = 39,39 \text{ k}\Omega$$

$$10 \text{ k}\Omega \cdot 1,01 = 10,1 \text{ k}\Omega$$

Verstärkungen:

$$A_{min} = -\frac{38,61 \text{ k}\Omega}{10,1 \text{ k}\Omega} = -3,823$$

$$A_{max} = -\frac{39,39 \text{ k}\Omega}{9,9 \text{ k}\Omega} = -3,979$$

#### 1.1.4 d)

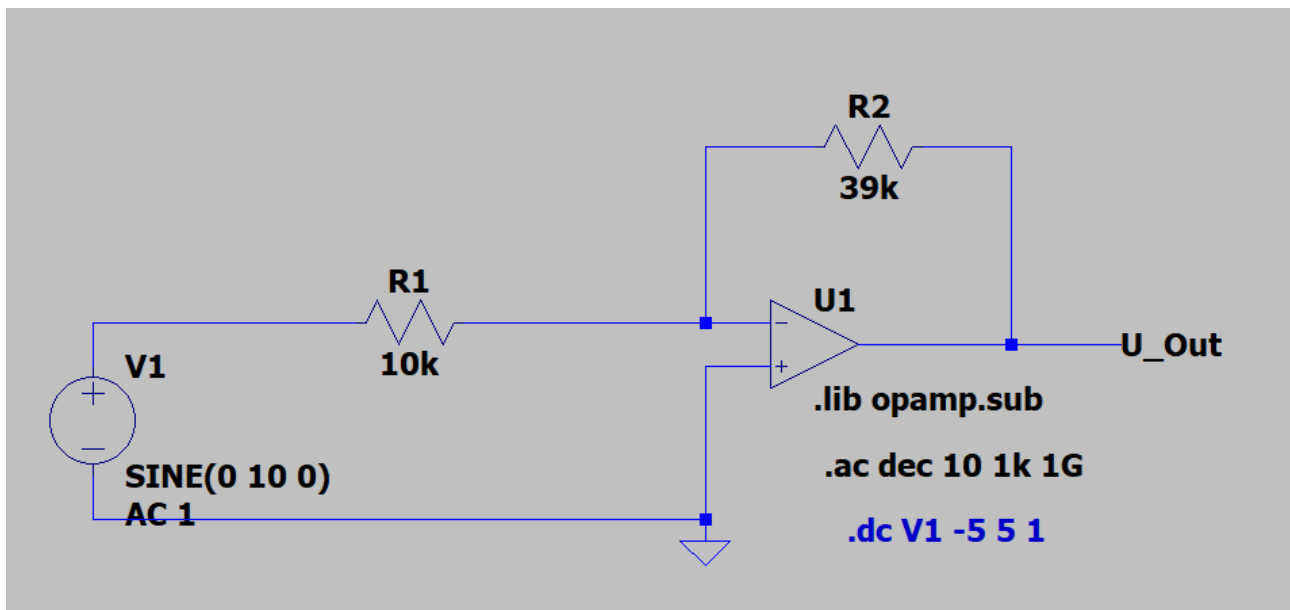


Figure 2: Schaltung samt Simulationsaufforderungen

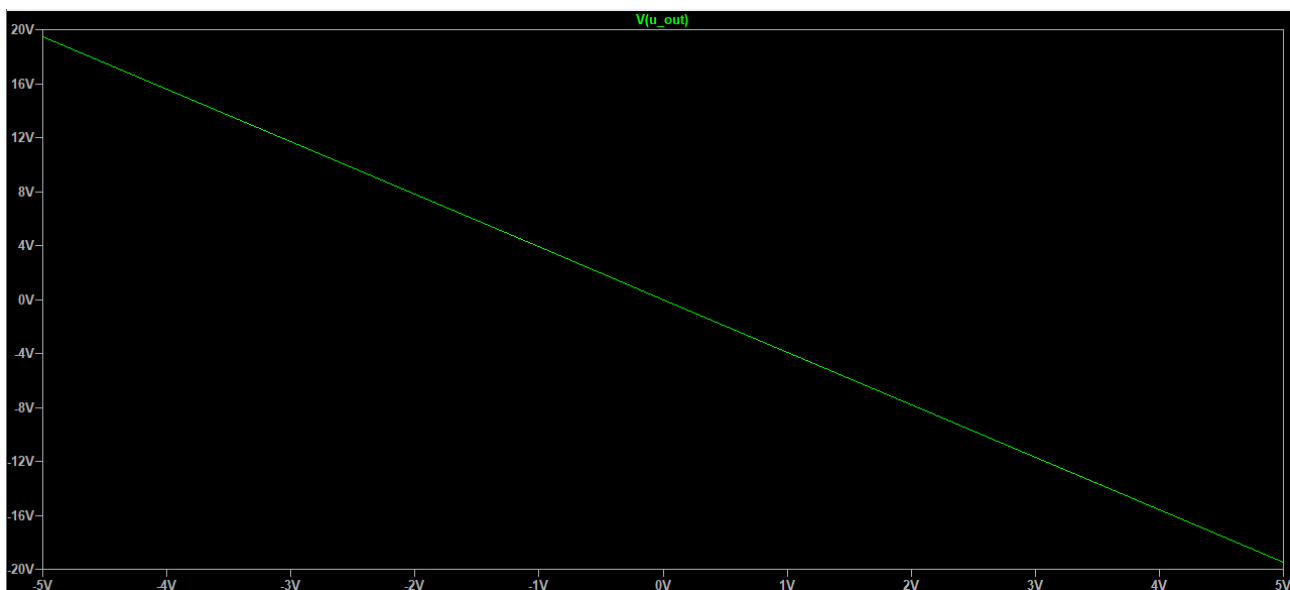


Figure 3: Der Plot der DC Sweep Simulation

Man kann dem Plot entnehmen, dass die OPV-Schaltung das Eingangssignal mit einer Verstärkung von ca. -4 verringert.

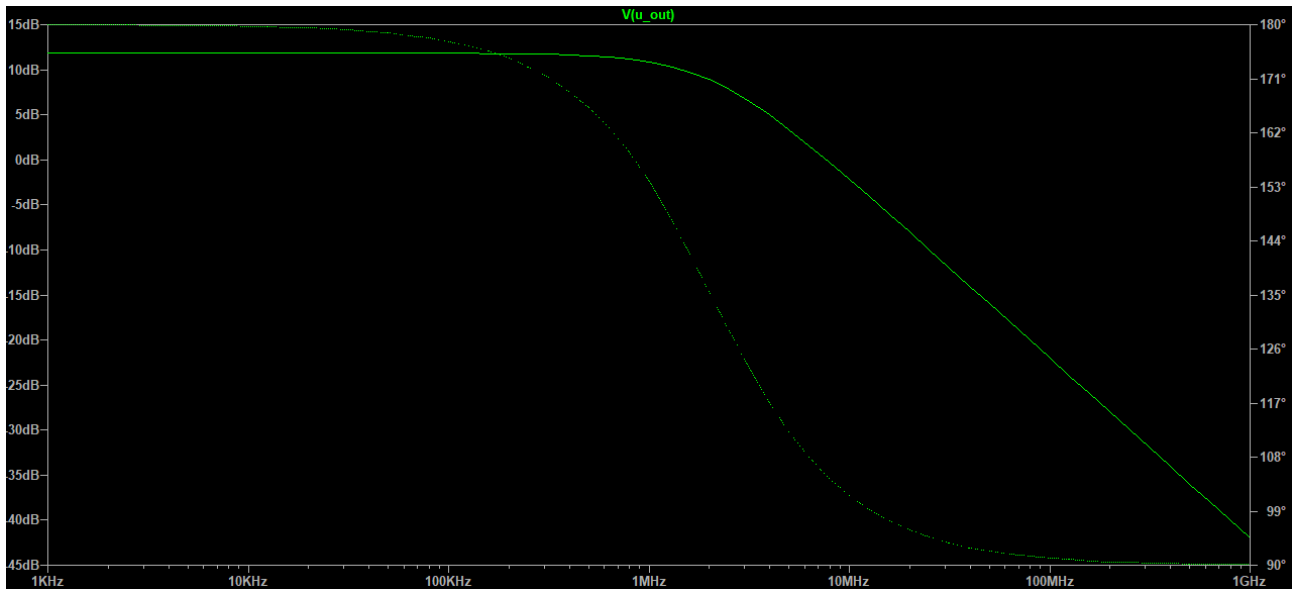


Figure 4: Plot der AC Analysis Simulation

Man kann erkennen, dass ab einer Frequenz von ca.  $1 \text{ MHz}$  die Verstärkung absackt und ab einer Frequenz von ca.  $100 \text{ kHz}$  der Phasenwinkel von ungefähr  $180^\circ$  gegen  $0$  geht. Bei niedrigeren Frequenzen als den Dargestellten verlaufen beide Graphen nahezu linear.

## 1.2 Nichtinvertierender Operationsverstärker

### 1.2.1 a)

Kenngrößen eines idealen OPVs:

- $U_d = 0 \text{ V}$
- $r_e \rightarrow \infty$
- $r_a \rightarrow \infty$
- $A \rightarrow \infty$ , hier allerdings als endlich angenommen.

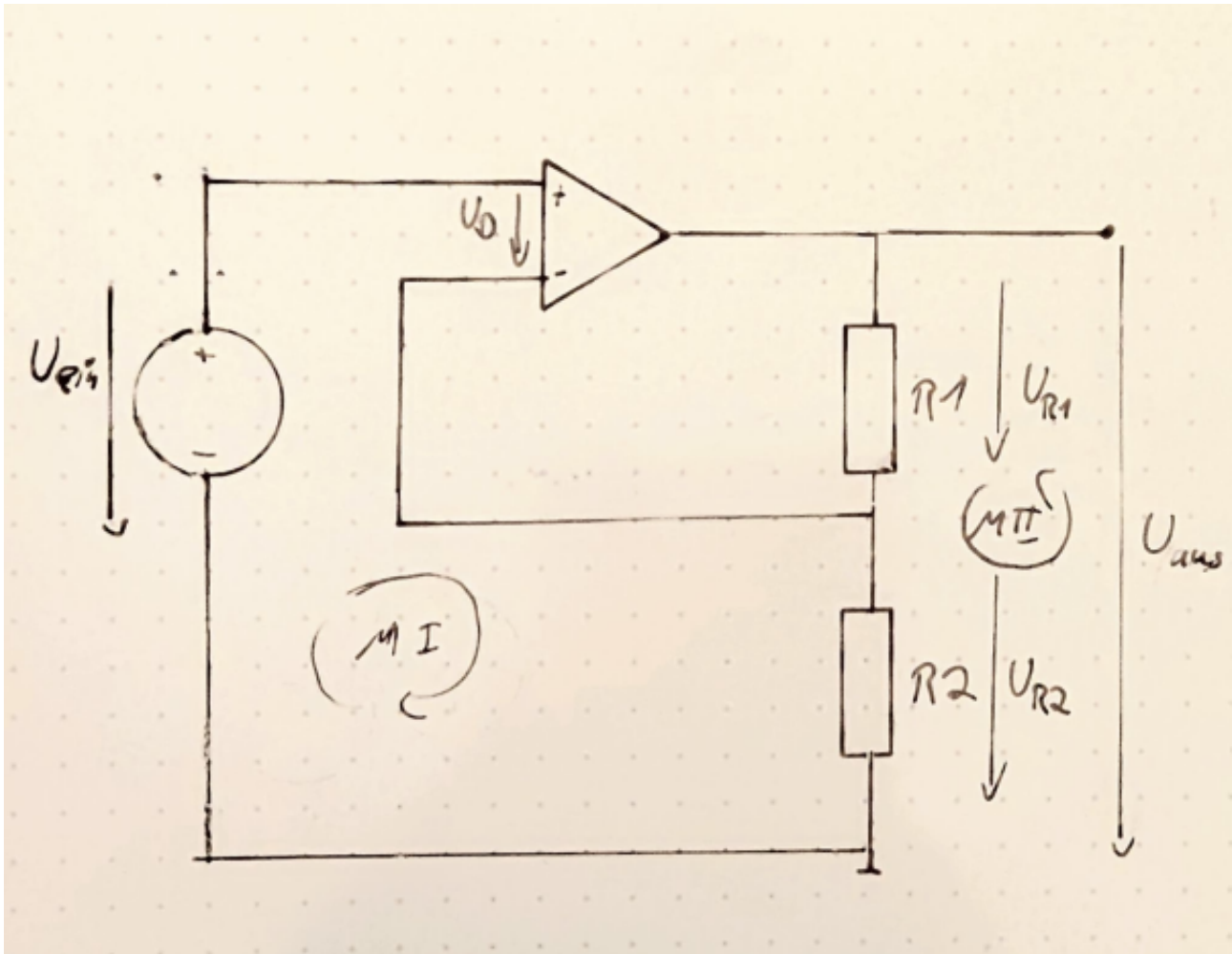


Figure 5: Der gegebene Schaltplan mit Spannungspfeilen und Maschen

Über Maschen:

M1:

$$-U_{ein} + U_d + U_{R2} = 0$$

$$\Leftrightarrow -U_{ein} + U_d + R_2 \cdot I = 0$$

$$\Leftrightarrow U_{ein} = R_2 \cdot I + U_d$$

$$\Leftrightarrow U_{ein} = R_2 \cdot I$$

M2:

$$-U_{aus} + U_{R_1} + U_{R_2} = 0$$

$$\Leftrightarrow -U_{aus} + R_1 \cdot I + R_2 \cdot I = 0$$

$$\Leftrightarrow U_{aus} = I(R_1 + R_2)$$

Nach  $I$  umstellen:

$$1): U_{ein} = R_2 \cdot I \Leftrightarrow I = \frac{U_{ein}}{R_2}$$

$$2): U_{aus} = I(R_1 + R_2) \Leftrightarrow I = \frac{U_{aus}}{R_1 + R_2}$$

Gleichsetzen:

$$\frac{U_{ein}}{R_2} = I = \frac{U_{aus}}{R_1 + R_2}$$

$$\Leftrightarrow \frac{U_{ein}}{R_2} = \frac{U_{aus}}{R_1 + R_2}$$

$$\Leftrightarrow U_{aus} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \cdot U_{ein}$$

$$\Leftrightarrow U_{aus} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)$$

$$\Leftrightarrow A = \frac{U_{aus}}{U_{ein}} = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

Wenn man die endliche Verstärkung  $A_D$  berücksichtigt:

$$U_{aus} = A_D \cdot U_{OS} = A_D \cdot (U_{i+} - U_{i-})$$

$$\Leftrightarrow U_{aus} = A_D \cdot \left(U_{ein} - U_{aus} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)$$

$$\Leftrightarrow U_{aus} \left(1 + A_D \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) = A_D U_{ein}$$

$$\Leftrightarrow \frac{U_{aus}}{U_{ein}} = \frac{A_D}{\left(1 + A_D \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)} = \frac{R_1 + R_2}{\frac{1}{A_D}(R_1 + R_2) + R_2}$$

### 1.2.2 b)

Bei einem idealen OPV fließt der gesamte Eingangsstrom  $I_{ein}$  über die Rückkopplung zum Ausgang. Daraus folgt, dass in den Eingang des OPVs kein Strom fließt:

$$r_e = \frac{U_{ein}}{I_{ein}}$$

$$r_e = \lim_{I_{ein} \rightarrow 0} \frac{U_{ein}}{I_{ein}} \Rightarrow \infty$$

### 1.2.3 c)

gegeben:

- $A_{D0} = 5$
- $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$



$$A_{D0} = \frac{U_{aus}}{U_{ein}} = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

$$\Leftrightarrow R_2 = \frac{R_1}{A-1} = \frac{10 \text{ k}\Omega}{5-1} = 2,5 \text{ k}\Omega$$

#### 1.2.4 d)

a) Die kleinstmögliche Verstärkung geht gegen 1, da  $A_D = 1 + \frac{R_1}{R_2} = 1 + \frac{\lim_{R_1 \rightarrow 0} R_1}{\lim_{R_2 \rightarrow 0} R_2} \Rightarrow 1$

b) Die Verstärker Schaltung mit Kurzschlüssen anstelle von Widerständen heißt Spannungsfolger.

#### 1.2.5 e)

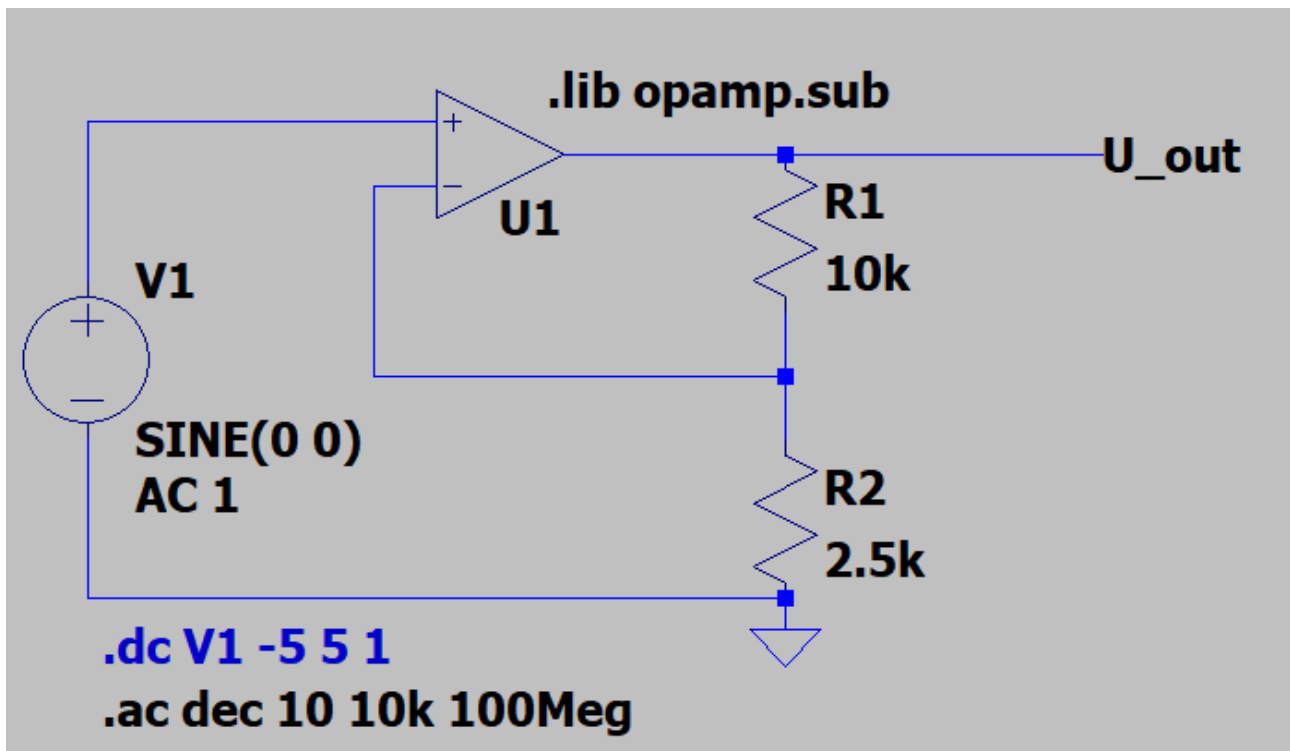


Figure 6: Die Simulierte Schaltung

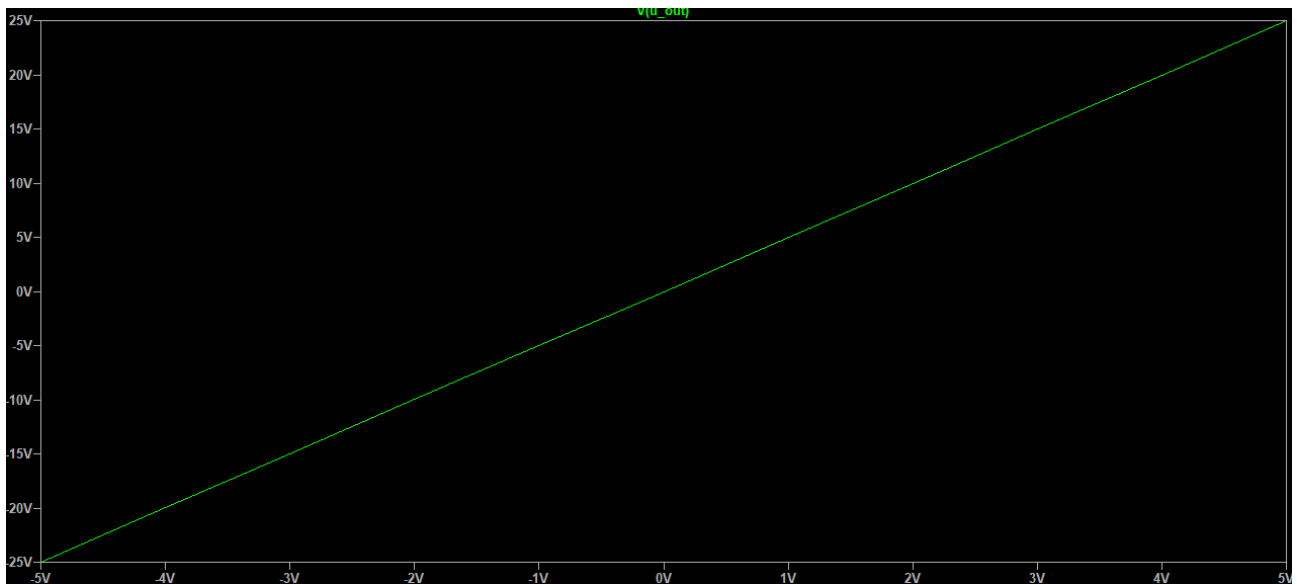


Figure 7: Plot der DC Simulation des nichtinvertierenden OPVs

### 1.2.6 f)

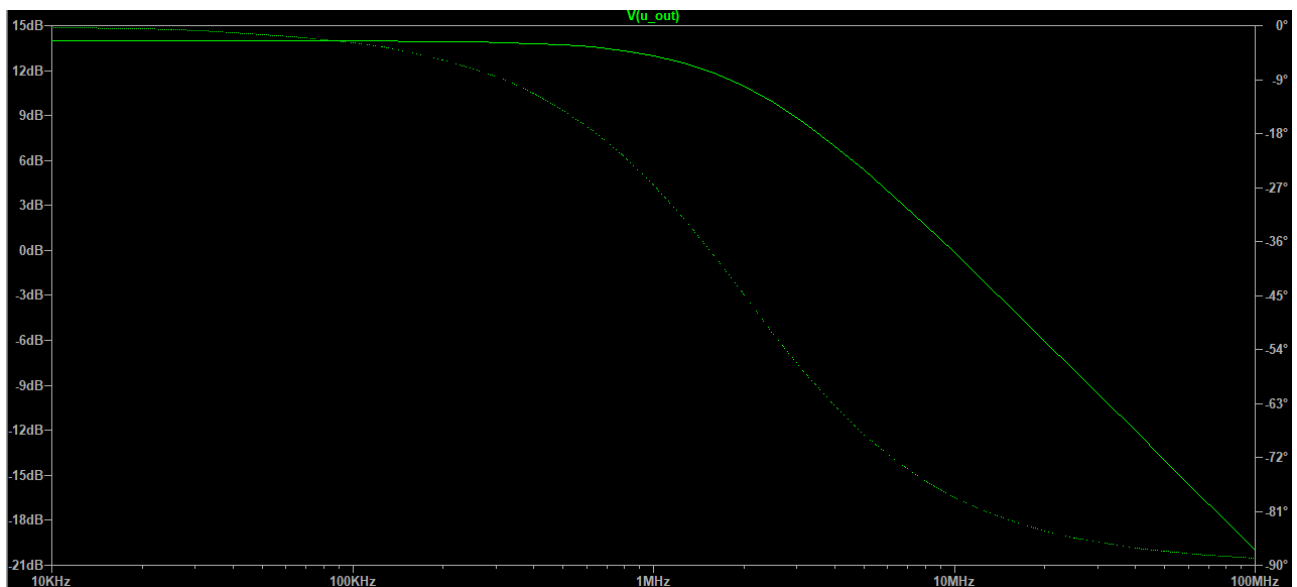


Figure 8: Plot der AC Simulation des nichtinvertierenden OPVs

### 1.2.7 g)

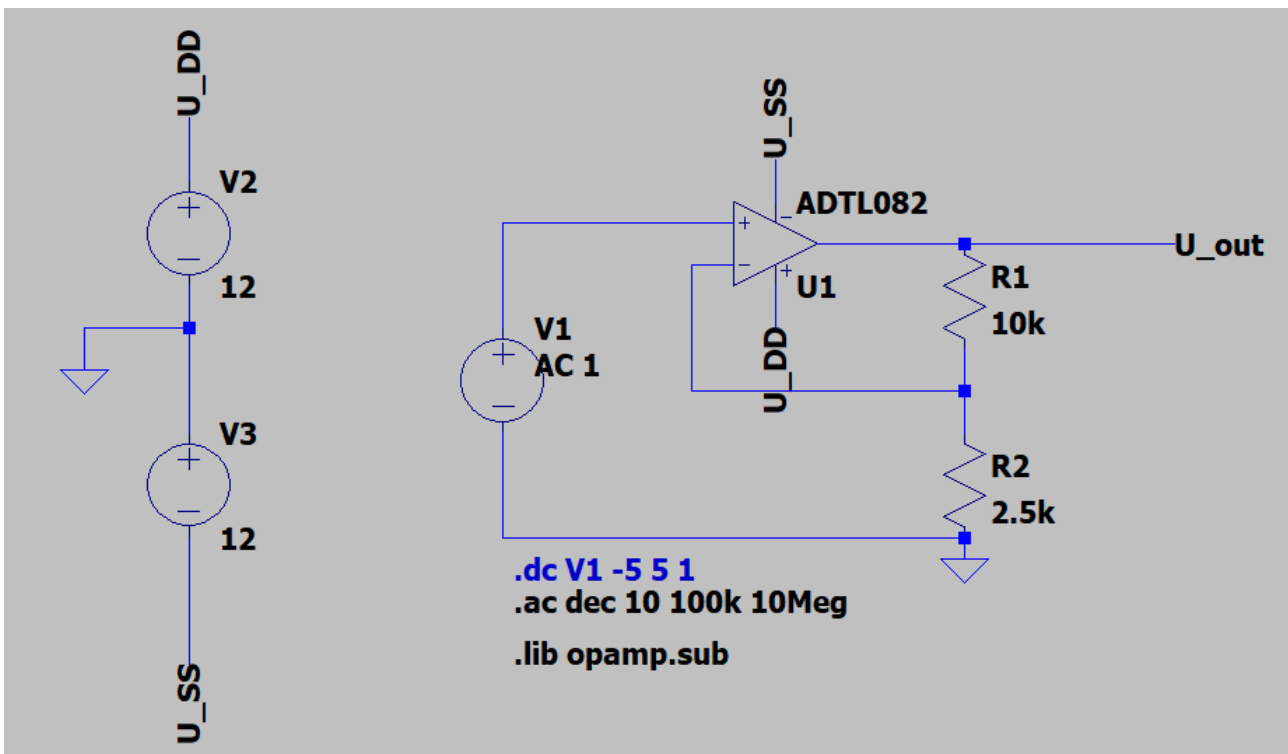


Figure 9: Die simulierte Schaltung mit realem OPV

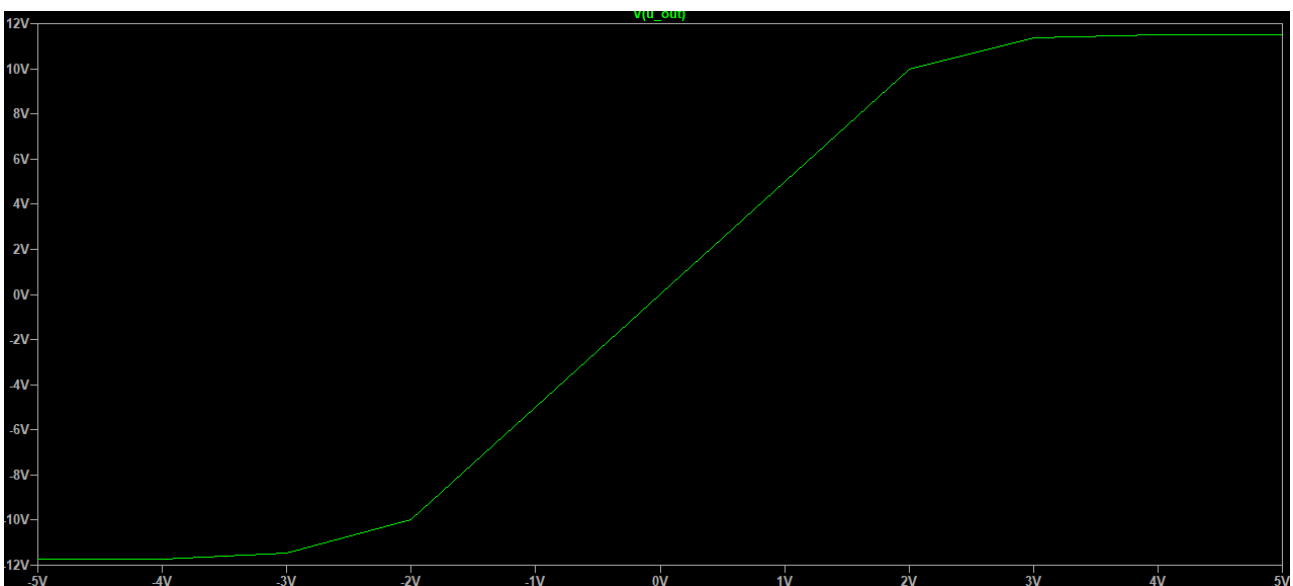


Figure 10: Die DC Simulation des realen nichtinvertierenden OPVs

Der reale OPV verhält sich im Bereich von  $\pm 2\text{ V}$  wie der ideale. Wird  $\Delta U_{aus}$  größer, flacht die Ausgangskennlinie ab und geht gegen  $\pm 12\text{ V}$ , da dies die gewählte Eingangsspannung des OPVs ist. Da der OPV einen Verstärkungsfaktor von 5 hat, würde er ab  $\pm 3\text{ V}$  bereits eine Ausgangsspannung von  $\pm 15\text{ V}$  haben, diese ist höher als die Betriebsspannung des OPVs und kann deshalb nicht erreicht werden. Die Ausgangsspannung wird auf die maximale Betriebsspannung begrenzt.

### 1.2.8 h)

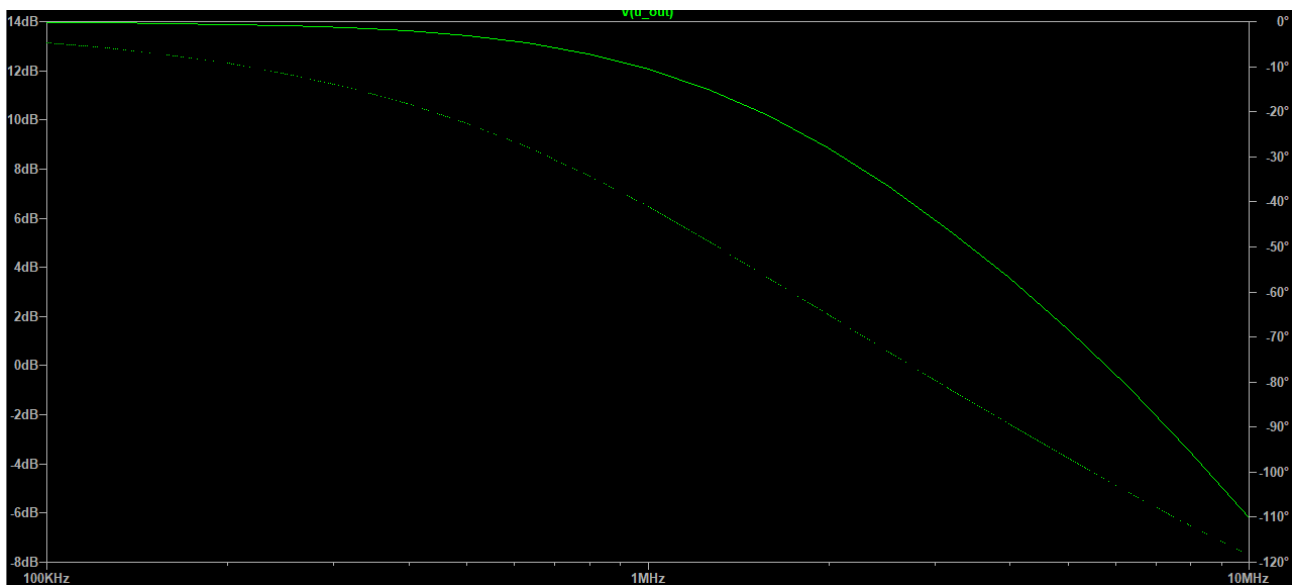


Figure 11: Die AC Simulation des realen nichtinvertierenden OPVs

Man kann erkennen, dass bei dem realen OPV die Verstärkung bei einer kleineren Frequenz bereits abflacht und auch schneller fällt. Dies liegt auch an der Begrenzung der größtmöglichen Verstärkung durch die Betriebsspannung des OPVs.

## 1.3 Hochohmige Spannungsquelle

### 1.3.1 a)

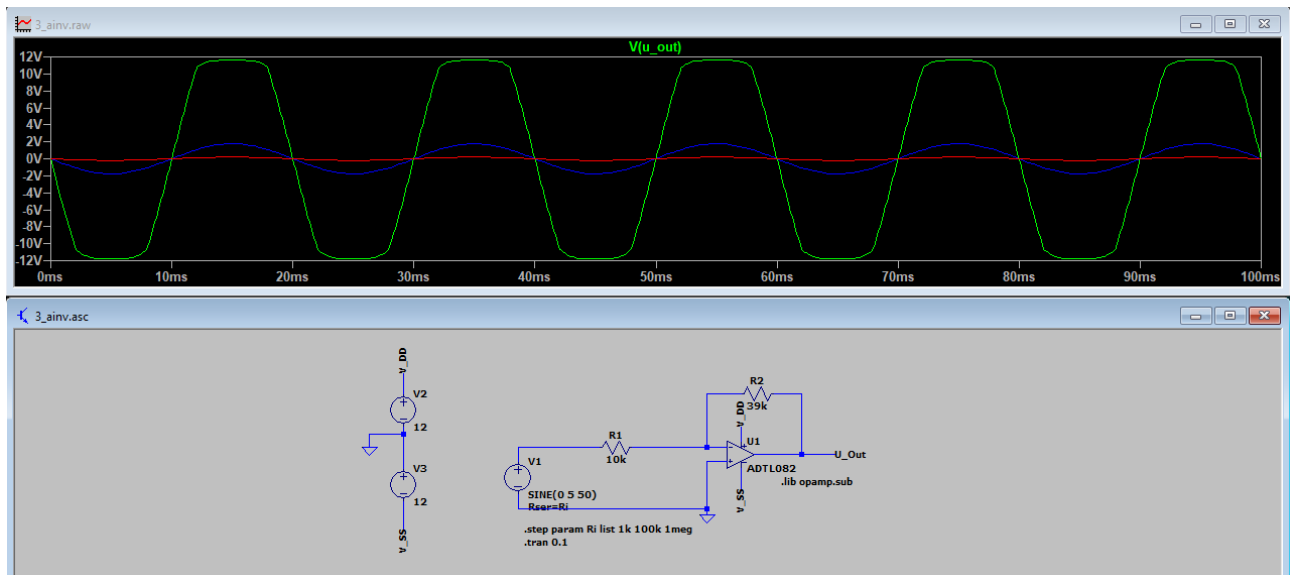


Figure 12: invertierender OPV mit hochohmiger Spannungsquelle

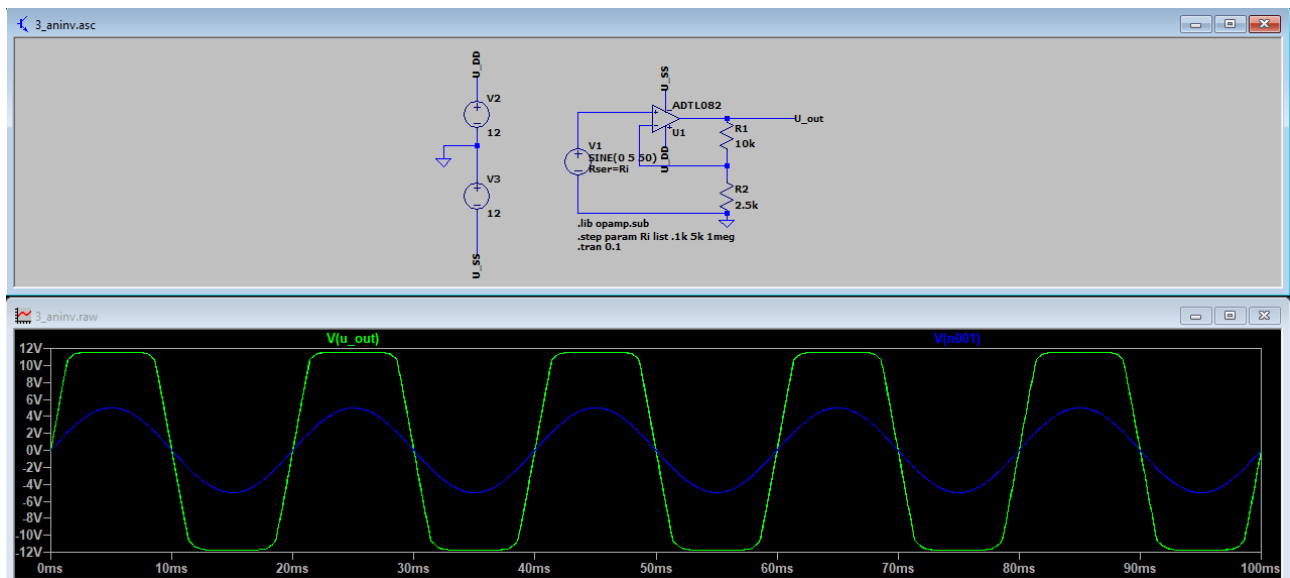


Figure 13: nichtinvertierender OPV mit hochohmiger Spannungsquelle

### 1.3.2 b)

Man kann erkennen, dass der Innenwiderstand der Spannungsquelle eine Auswirkung auf die Ausgangsspannung eines invertierenden OPVs hat, auf die eines nichtinvertierenden OPVs allerdings nicht.

Bei einem invertierenden OPV bilden der Innenwiderstand der Quelle und der Eingangswiderstand des OPVs einen Spannungsteiler. Je höher der Innenwiderstand der Spannungsquelle wird, desto mehr Spannung fällt darüber ab und desto weniger Spannung liegt am Eingang des OPVs an.

Bei nichtinvertierenden OPVs wird die Quelle an den  $+$ -Eingang des OPVs gelegt, der einen nahezu unendlich großen Widerstand besitzt, weshalb der resultierende Spannungsteiler keine Gewichtung hat.

## 1.4 Differentiator und Integrator

Differentiator:

- Grundschtaltung des invertierenden OPVs
- $R_1$  wird durch einen Kondensator ausgetauscht
- weist Hochpassverhalten auf (steigende Frequenz führt zu steigender Ausgangsspannung)
- Ausgangsspannung stellt Ableitung/Differenzierung der Eingangsspannung dar
- Übertragungsfunktion:  $U_{aus}(t) = -R \cdot C \cdot \frac{\Delta U_{ein}}{\Delta t}$

Integrator:

- Grundschtaltung des invertierenden OPVs
- $R_2$  (Rückkopplungswiderstand) wird durch einen Kondensator ausgetauscht
- weist Tiefpassverhalten auf (steigende Frequenz führt zu sinkender Ausgangsspannung)
- verhält sich komplementär zum Differentiator
- Ausgangsspannung stellt Integral der Eingangsspannung dar
- Übertragungsfunktion:  $U_{aus}(t) = -\frac{1}{R \cdot C} \int_0^t U_{ein}(t) dt$