

# Aufbau eines eigenen Oszilloskops

Sonja Schönauer, Nicolas Scherrer  
4BHEL

26. September 2025

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zielsetzung</b>	<b>4</b>
<b>2 Theoretische Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1 Was ist ein Oszilloskop? . . . . .	5
2.1.1 Was ein Oszilloskop kann . . . . .	5
2.1.2 Was ein Oszilloskop nicht kann . . . . .	5
2.2 AFE (Analog-Front-End) . . . . .	6
2.3 Superpositionsprinzip (Helmholtz) . . . . .	6
2.4 Spannungsteiler . . . . .	6
<b>3 Aufbau der Grundschaltung</b>	<b>7</b>
<b>4 Spannungsquelle <math>V_{CC}</math> kurzgeschlossen</b>	<b>8</b>
<b>5 Spannungsquelle <math>U_E</math> kurzgeschlossen</b>	<b>9</b>
<b>6 Berechnungen</b>	<b>10</b>
6.1 Substitution der Spannungsteiler . . . . .	10
6.2 Berechnung für $\pm 36\text{ V}$ . . . . .	10
6.2.1 Widerstandsberechnung . . . . .	11
6.2.2 $U_A$ prüfen rechnerisch: . . . . .	13
6.2.3 $U_A$ prüfen mit Simulation: . . . . .	13
6.3 Berechnung für $\pm 10\text{ V}$ . . . . .	14
6.3.1 Widerstandsberechnung . . . . .	14
6.3.2 $U_A$ prüfen rechnerisch: . . . . .	16
6.3.3 $U_A$ prüfen mit Simulation: . . . . .	17
6.4 Berechnung für $\pm 1\text{ V}$ . . . . .	18
6.4.1 Widerstandsberechnung . . . . .	18
6.4.2 $U_A$ prüfen rechnerisch: . . . . .	20
6.4.3 $U_A$ prüfen mit Simulation: . . . . .	21
6.5 OPV . . . . .	22
6.5.1 Nicht-invertierender Verstärker . . . . .	22
6.5.2 Verstärker-Schaltung . . . . .	22
6.5.3 Berechnungen für die Verstärker-Schaltung . . . . .	23
6.6 Vergleichen von Messdaten und Simulationsdaten . . . . .	24
6.6.1 Gemessen bei $\pm 10\text{ V}$ . . . . .	24
6.6.2 Simulation bei $\pm 10\text{ V}$ . . . . .	25
6.6.3 Schaltung mit $\pm 1\text{ V}$ . . . . .	26
6.6.4 Simulation bei $\pm 1\text{ V}$ . . . . .	27
6.6.5 Schaltung mit $\pm 1\text{ V}$ und OPV . . . . .	28

6.6.6	Simulation mit $\pm 1\text{ V}$ und OPV . . . . .	29
6.6.7	Schaltung mit $\pm 36\text{ V}$ . . . . .	30
6.6.8	Simulation mit $\pm 36\text{ V}$ . . . . .	30
<b>7</b>	<b>Schaltplan</b>	<b>31</b>
7.1	Erklärung des Schaltplans . . . . .	32
7.1.1	Eingänge . . . . .	32
7.1.2	Schalter . . . . .	33
7.1.3	Spannungsteiler . . . . .	34
7.1.4	Kondensatoren . . . . .	35
7.1.5	OPV . . . . .	36
7.1.6	$\mu\text{C}$ . . . . .	37

# Aufgabenstellung

Entwurf eines analogen Front Ends (AFE) für ein Oszilloskop, das folgende Eingangssignale verarbeitet:

- $\pm 36 \text{ V}$
- $\pm 10 \text{ V}$
- $\pm 1 \text{ V}$

Die Signale sollen für einen Mikrocontroller ( $\mu\text{C}$ ) mit einem ADC-Eingangsspannungsbereich von 0 V bis 3,3 V aufbereitet werden.

## 1 Zielsetzung

- Skalierung der drei unterschiedlichen Eingangsspannungsbereiche auf eine Ausgangsspannung  $U_A(0 \text{ V} \text{ bis } 3,3 \text{ V})$ .
- Signalverschiebung (Offset), um negative Eingangsspannungen in den positiven Spannungen zu wandeln.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Was ist ein Oszilloskop?

Ein Oszilloskop (kurz: *Oszi*) ist ein Messgerät, das elektrische Spannungsverläufe sichtbar macht. Es zeigt, wie sich eine Spannung in Abhängigkeit von der Zeit verändert. Dadurch können schnelle Signalformen dargestellt und analysiert werden.

#### 2.1.1 Was ein Oszilloskop kann

- **Spannungsverläufe anzeigen:** Darstellung von Sinus-, Rechteck-, Dreiecksignalen, PWM und Störungen.
- **Sehr schnelle Signale messen:** Moderne digitale Oszilloskope erreichen Abtastraten im Mega- bis Gigahertzbereich.
- **Signalparameter bestimmen:** Messung von Amplitude, Spitzenwert, Spitzen-Spitzen-Wert, Frequenz, Periodendauer, Tastverhältnis, Anstiegs- und Abfallzeiten.
- **Mehrere Kanäle gleichzeitig messen:** Typischerweise 2 bis 4 Kanäle, High-End-Geräte mehr.
- **Signale vergleichen:** Eingang und Ausgang eines Systems können gleichzeitig betrachtet werden.
- **Triggern:** Das Gerät kann Messungen bei bestimmten Ereignissen starten (z. B. Spannungsüberschreitung).
- **Digitale Protokolle dekodieren (moderne Geräte):** UART, SPI, I<sup>2</sup>C usw.

#### 2.1.2 Was ein Oszilloskop nicht kann

- **Keine direkte Strommessung:** Ein Oszilloskop misst grundsätzlich Spannungen. Strommessung nur über Shunt-Widerstand oder Stromzange.
- **Kein Ersatz für ein Multimeter:** Es ist nicht für präzise Gleichspannungs-, Widerstands- oder Kapazitätsmessungen gedacht.
- **Keine hohen Spannungen ohne Zubehör:** Spannungen über etwa ±300 V benötigen spezielle 10x/100x-Tastköpfe oder Differenzialsonden.

- **Zeigt keine idealisierten Werte:** Es zeigt reale Rohsignale inklusive Rauschen und Störungen.
- **Begrenzte Speicherlänge:** Auch Speicheroszilloskope können nur begrenzte Zeitfenster aufzeichnen, abhängig von der Abtastrate.

## 2.2 AFE (Analog-Front-End)

Das **Analog Front End (AFE)** ist der analoge Signalverarbeitungsteil eines Messsystems, beispielsweise eines Oszilloskops. Es dient der Vorbereitung und Anpassung eines Eingangssignals für die nachfolgende digitale Verarbeitung, in unserem Fall der ADC eines µC. Das AFE ist somit entscheidend für die Qualität der Messung, da es das Signal optimiert, bevor es digitalisiert wird.

## 2.3 Superpositionsprinzip (Helmholtz)

Mit Hilfe des **Superpositionsprinzips** ist es möglich, die Ausgangsspannung  $U_A$  zu berechnen. Dabei wird in der Grundschaltung jeweils nur **eine** Spannungsquelle aktiv gelassen, während alle anderen Spannungsquellen durch einen Kurzschluss ersetzt werden.

$$U_A = U'_A + U''_A$$

- $U'_A$ : Ausgangsspannung bei aktiver Quelle  $U_E$  (mit  $V_{CC} = 0$ )
- $U''_A$ : Ausgangsspannung bei aktiver Quelle  $V_{CC}$  (mit  $U_E = 0$ )

## 2.4 Spannungsteiler

Mithilfe von Spannungsteilern lassen sich die Ausgangsspannungen bei den jeweiligen aktiven Quellen bestimmen. Durch geeignete Wahl der Widerstandswerte im Spannungsteiler kann die Eingangsspannung so skaliert werden, dass sie innerhalb des gewünschten Messbereichs (0 V bis 3,3 V) liegt.

### 3 Aufbau der Grundschatzung

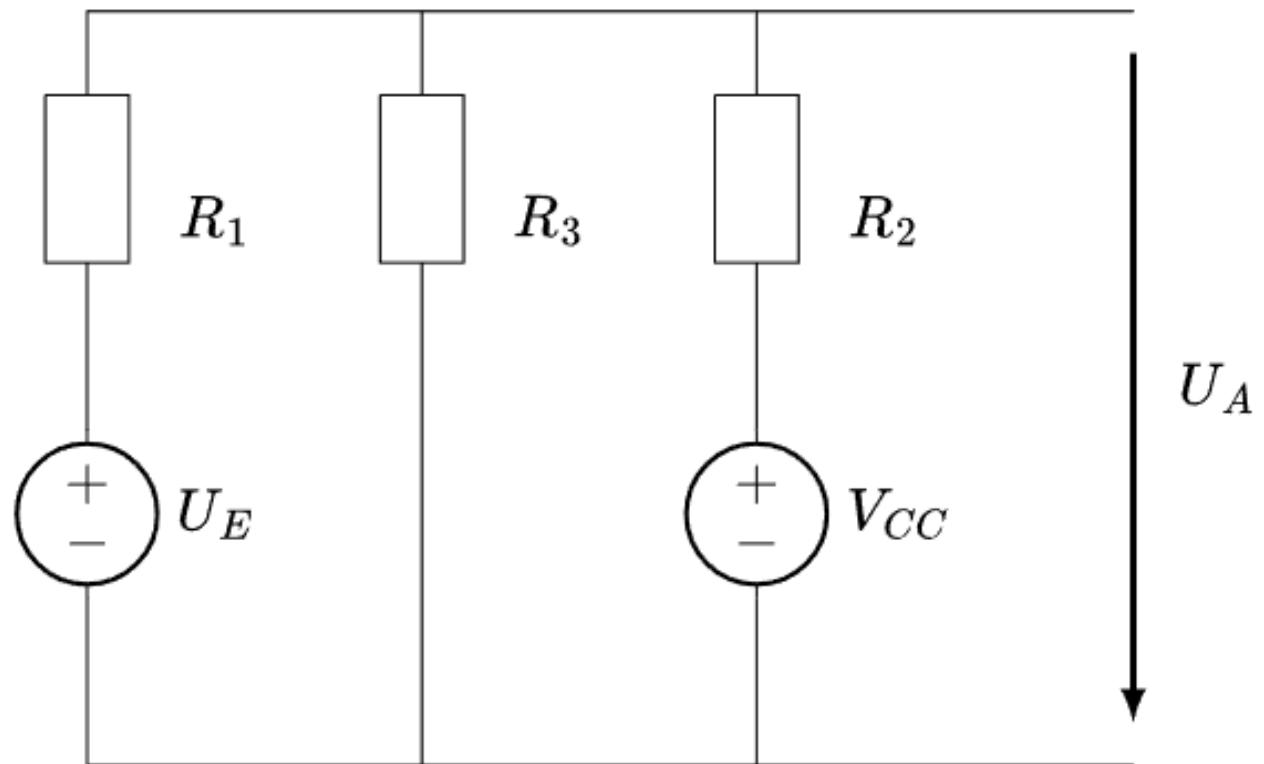


Abbildung 1: Grundschatzung

## 4 Spannungsquelle $V_{CC}$ kurzgeschlossen

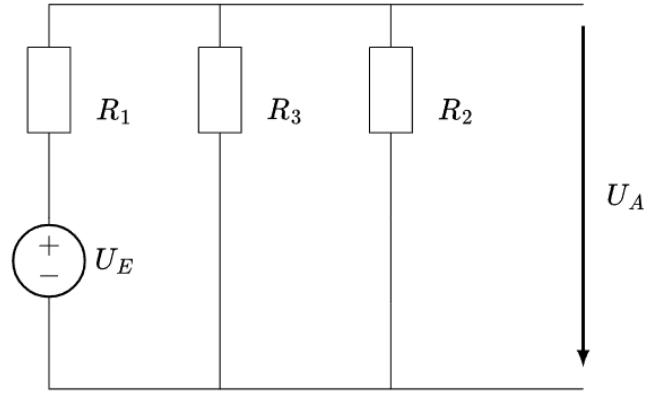


Abbildung 2: Spannungsquelle  $V_{CC}$  kurzgeschlossen

Spannungsteiler:

$$U'_A = U_E \cdot \frac{R_2 \parallel R_3}{R_1 + (R_2 \parallel R_3)}$$

Widerstände umschreiben:

$$R_{23} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}$$

Substitution:

$$B = \frac{R_{23}}{R_{23} + R_1}$$

## 5 Spannungsquelle $U_E$ kurzgeschlossen

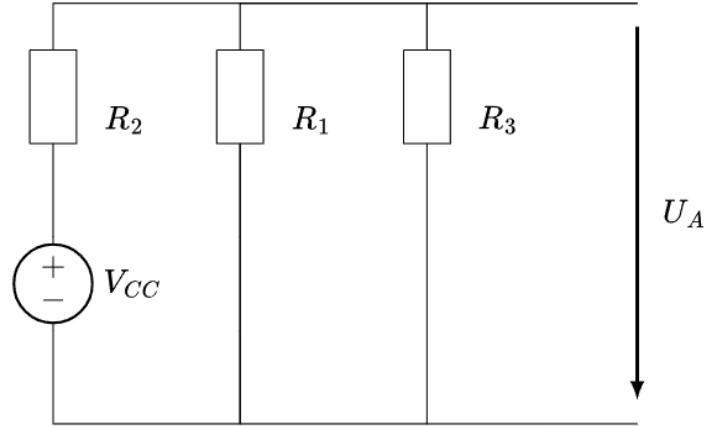


Abbildung 3: Spannungsquelle  $U_E$  kurzgeschlossen

Spannungsteiler:

$$U''_A = V_{CC} \cdot \frac{R_1 \parallel R_3}{R_2 + (R_1 \parallel R_3)}$$

Widerstände umschreiben:

$$R_{13} = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3}$$

Substitution:

$$A = \frac{R_{13}}{R_{13} + R_2}$$

## 6 Berechnungen

### 6.1 Substitution der Spannungsteiler

Wir ersetzen die Spannungsteiler durch die Variablen  $A$  und  $B$ :

$$\begin{aligned}U'_A &= U_E \cdot B \\U''_A &= V_{CC} \cdot A \\U_A &= V_{CC} \cdot A + U_E \cdot B\end{aligned}$$

### 6.2 Berechnung für $\pm 36$ V

**Gleichungssystem für  $A$  und  $B$ :**

Die Grenzfälle werden eingesetzt. Wenn eine Eingangsspannung  $U_E$  von +36V anliegt ist unsere Ausgangsspannung  $U_A = 3.3$ V. Wenn eine Eingangsspannung  $U_E$  von -36V anliegt ist unsere Ausgangsspannung  $U_A = 0$ V.

$$\begin{aligned}U_A &= V_{CC} \cdot A + U_E \cdot B \\I: \quad 3.3 &= 3.3 \cdot A + 36 \cdot B \\II: \quad 0 &= 3.3 \cdot A - 36 \cdot B \\\Rightarrow \quad 3.3 \cdot A &= 36 \cdot B \\\Rightarrow \quad B &= \frac{3.3}{36} \cdot A = 0.0917 \cdot A\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}B \text{ einsetzen in Gleichung I: } 3.3 &= 3.3 \cdot A + 36 \cdot 0.0917 \cdot A \\3.3 &= 3.3 \cdot A + 3.3 \cdot A = 6.6 \cdot A \\\Rightarrow \quad A &= \frac{3.3}{6.6} = 0.5\end{aligned}$$

$$A \text{ einsetzen in die Formel für } B: \Rightarrow \quad B = 0.0917 \cdot 0.5 = 0.0458$$

### 6.2.1 Widerstandsberechnung

Bekannte Zusammenhänge:

$$\begin{aligned} I : A &= \frac{R_{13}}{R_{13} + R_2} \\ II : B &= \frac{R_{23}}{R_{23} + R_1} \\ III : R_1 &= 1 \text{ M} - R_3 \end{aligned}$$

A einsetzen:

$$\begin{aligned} I : \frac{R_{13}}{R_{13} + R_2} &= 0.5 \\ R_{13} &= 0.5(R_{13} + R_2) \\ R_{13} &= 0.5R_{13} + 0.5R_2 \\ R_{13} - 0.5R_{13} &= 0.5R_2 \\ 0.5R_{13} &= 0.5R_2 \\ I : R_2 &= R_{13} = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3} \end{aligned}$$

III in I:

$$\begin{aligned} R_2 &= \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3} = \frac{(1 \text{ M}\Omega - R_3) \cdot R_3}{1 \text{ M}\Omega} \\ &= \frac{(1 \text{ M}\Omega - R_3) \cdot R_3}{1 \text{ M}\Omega} \end{aligned}$$

B einsetzen:

$$\begin{aligned} II : \frac{R_{23}}{R_{23} + R_1} &= 0.0458 \\ 0.0458(R_1 + R_{23}) &= R_{23} \\ 0.0458R_1 + 0.0458R_{23} &= R_{23} && | - 0.0458R_{23} \\ 0.0458R_1 &= 0.954R_{23} && | /0.0458 \\ R_1 &= \frac{0.954}{0.0458} \cdot R_{23} \\ II : R_1 &= 20.83R_{23} \end{aligned}$$

II: umschreiben:

$$II : R_1 = 20.83 \cdot \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}$$

III in II:

$$\begin{aligned}
 1M - R_3 &= 20.83 \cdot \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} && |(R_2 + R_3) \\
 (1M - R_3)(R_2 + R_3) &= 20.83 R_2 R_3 \\
 (1M - R_3)R_2 + (1M - R_3)R_3 &= 20.83 R_2 R_3 && |- 20.83 R_2 R_3 \\
 R_2(1M - R_3) + R_3(1M - R_3) - 20.83 R_2 R_3 &= 0 \\
 R_2(1M - R_3 - 20.83 R_3) + R_3(1M - R_3) &= 0 && |- R_3(1M - R_3) \\
 R_2(1M - R_3 - 20.83 R_3) &= -R_3(1M - R_3) && |/(1M - R_3 - 20.83 R_3) \\
 R_2 &= \frac{-R_3(1M - R_3)}{(1M - R_3) - 20.83 R_3} \\
 \text{III=II} \\
 \frac{-R_3(1M - R_3)}{(1M - R_3) - 20.83 R_3} &= \frac{(1M - R_3) R_3}{1} M \\
 -(1M - R_3 - 20.83 R_3) &= 1M \\
 -1M + R_3 + 20.83 R_3 &= 1M \\
 -1M + 21.83 R_3 &= 1M && | + 1M \\
 21.83 R_3 &= 2M && | \div 21.83 \\
 R_3 &= \frac{2M}{21.83} \approx 91.62 \text{ k}\Omega
 \end{aligned}$$

$$R_3 = 91 \text{ k}\Omega \quad (\text{E24 genormt})$$

$R_1$  und  $R_2$  berechnen mit  $R_3 = 91 \text{ k}\Omega$ :

$$\begin{aligned}
 R_1 &= 1 \text{ M}\Omega - 91 \text{ k}\Omega = 909 \text{ k}\Omega \quad (\text{E24-Näherung: } [910 \text{ k}\Omega]) \\
 R_2 &= \frac{(1 \text{ M}\Omega - 91 \text{ k}\Omega) \cdot 91 \text{ k}\Omega}{1 \text{ M}\Omega} = 82,81 \text{ k}\Omega \quad (\text{E24-Näherung: } [82 \text{ k}\Omega])
 \end{aligned}$$

### 6.2.2 $U_A$ prüfen rechnerisch:

$$U_A = U_E \cdot \frac{R_2 \parallel R_3}{R_1 + (R_2 \parallel R_3)} + V_{CC} \cdot \frac{R_1 \parallel R_3}{R_2 + (R_1 \parallel R_3)} = \\ = 3.3V \cdot 0.0458\Omega + 36V \cdot 0.5\Omega = 3.2991V$$

### 6.2.3 $U_A$ prüfen mit Simulation:

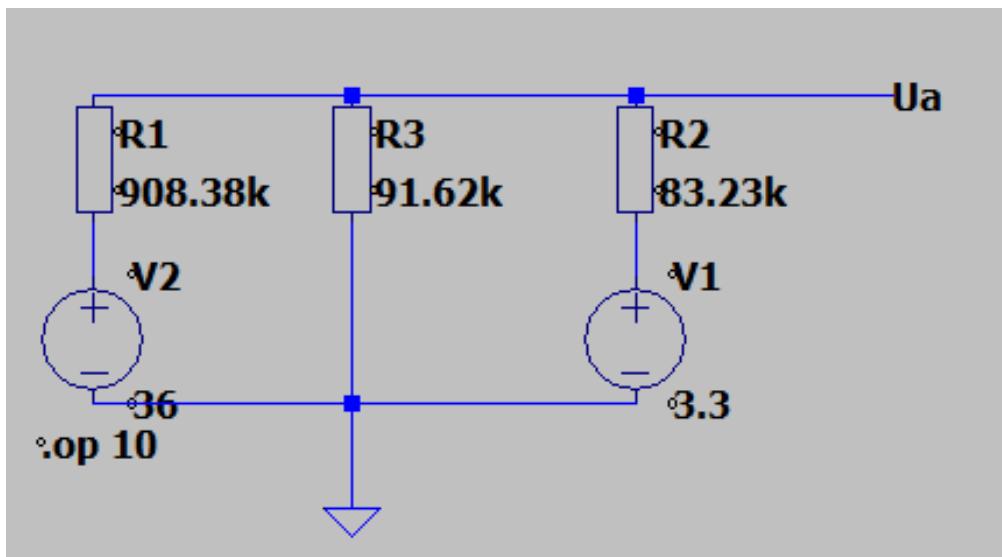


Abbildung 4: Schaltung für  $U_A$  Überprüfung bei 36V

--- Operating Point ---

$V(ua)$ :	3.29916	voltage
$V(ue)$ :	36	voltage
$V(vin)$ :	3.3	voltage
$I(R1)$ :	-3.59991e-05	device_current
$I(R2)$ :	-1.00928e-08	device_current
$I(R3)$ :	3.60092e-05	device_current
$I(V1)$ :	-1.00928e-08	device_current
$I(V2)$ :	-3.59991e-05	device_current

Abbildung 5:  $U_A$  bei 36V

### 6.3 Berechnung für $\pm 10$ V

Gleichungssystem für  $A$  und  $B$ :

Die Grenzfälle werden eingesetzt. Wenn eine Eingangsspannung  $U_E = +10$  V anliegt, ist die Ausgangsspannung  $U_A = 3.3$  V. Wenn  $U_E = -10$  V, dann ist  $U_A = 0$  V.

$$U_A = V_{CC} \cdot A + U_E \cdot B$$

$$\mathbf{I:} \quad 3.3 = 3.3 \cdot A + 10 \cdot B$$

$$\mathbf{II:} \quad 0 = 3.3 \cdot A - 10 \cdot B$$

$$\Rightarrow 3.3 \cdot A = 10 \cdot B$$

$$\Rightarrow B = \frac{3.3}{10} \cdot A = 0.33 \cdot A$$

$$\mathbf{B einsetzen in Gleichung I:} \quad 3.3 = 3.3 \cdot A + 10 \cdot 0.33 \cdot A$$

$$3.3 = 3.3 \cdot A + 3.3 \cdot A = 6.6 \cdot A$$

$$\Rightarrow A = \frac{3.3}{6.6} = 0.5$$

$$\mathbf{A einsetzen in die Formel für B:} \quad B = 0.33 \cdot 0.5 = 0.165$$

#### 6.3.1 Widerstandsberechnung

Bekannte Zusammenhänge:

$$\begin{aligned} I : A &= \frac{R_{13}}{R_{13} + R_2} \\ II : B &= \frac{R_{23}}{R_{23} + R_1} \\ III : R_1 &= 1M - R_3 \end{aligned}$$

**A einsetzen:**

$$\begin{aligned}
 I : \frac{R_{13}}{R_{13} + R_2} &= 0.5 \\
 R_{13} &= 0.5(R_{13} + R_2) \\
 R_{13} &= 0.5R_{13} + 0.5R_2 \\
 R_{13} - 0.5R_{13} &= 0.5R_2 \\
 0.5R_{13} &= 0.5R_2 \\
 I \Rightarrow R_2 &= R_{13} = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3}
 \end{aligned}$$

**III in I:**

$$R_2 = \frac{(1M - R_3) \cdot R_3}{1M}$$

**B einsetzen:**

$$\begin{aligned}
 II : \frac{R_{23}}{R_{23} + R_1} &= 0.165 \\
 0.165(R_1 + R_{23}) &= R_{23} \\
 0.165R_1 + 0.165R_{23} &= R_{23} \\
 0.165R_1 &= 0.835R_{23} \\
 R_1 &= \frac{0.835}{0.165} \cdot R_{23} \\
 II \Rightarrow R_1 &= 5.06 \cdot R_{23}
 \end{aligned}$$

**II umschreiben:**

$$R_1 = 5.06 \cdot \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}$$

**III in II:**

$$\begin{aligned}
 1M - R_3 &= 5.06 \cdot \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} && | \cdot (R_2 + R_3) \\
 (1M - R_3)(R_2 + R_3) &= 5.06 \cdot R_2 \cdot R_3 && \\
 (1M - R_3)R_2 + (1M - R_3)R_3 &= 5.06 \cdot R_2 \cdot R_3 && | - 5.06 \cdot R_2 \cdot R_3 \\
 R_2(1M - R_3 - 5.06R_3) + R_3(1M - R_3) &= 0 && | - R_3(1M - R_3) \\
 R_2(1M - R_3 - 5.06R_3) &= -R_3(1M - R_3) && | / (1M - R_3 - 5.06R_3) \\
 \Rightarrow R_2 &= \frac{-R_3(1M - R_3)}{(1M - R_3 - 5.06R_3)}
 \end{aligned}$$

**III = II:**

$$\frac{-R_3(1M - R_3)}{(1M - R_3 - 5.06R_3)} = \frac{(1M - R_3) \cdot R_3}{1M} | / (1M - R_3) \cdot R_3$$

$$\begin{aligned} -(1M - R_3 - 5.06 R_3) &= 1M \\ -1M + R_3 + 5.06 R_3 &= 1M \\ -1M + 6.06 R_3 &= 1M && | + 1M \\ 6.06 R_3 &= 2M \\ \Rightarrow R_3 &= \frac{2M}{6.06} \approx 330 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

**Berechnung der restlichen Widerstände:**

$$\begin{aligned} R_1 &= 1M - R_3 = 670 \text{ k}\Omega \\ R_2 &= \frac{(1M - R_3) \cdot R_3}{1M} = 221,1 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

**Gewählte Werte gemäß E24:**

$$\begin{aligned} R_3 &= \boxed{330 \text{ k}\Omega} \\ R_1 &= \boxed{680 \text{ k}\Omega} \\ R_2 &= \boxed{220 \text{ k}\Omega} \end{aligned}$$

**6.3.2  $U_A$  prüfen rechnerisch:**

$$\begin{aligned} U_A &= U_E \cdot \frac{R_2 \parallel R_3}{R_1 + (R_2 \parallel R_3)} + V_{CC} \cdot \frac{R_1 \parallel R_3}{R_2 + (R_1 \parallel R_3)} \\ &= 10 \text{ V} \cdot 0.165 + 3.3 \text{ V} \cdot 0.5 = 3,28 \text{ V} \end{aligned}$$

### 6.3.3 $U_A$ prüfen mit Simulation:

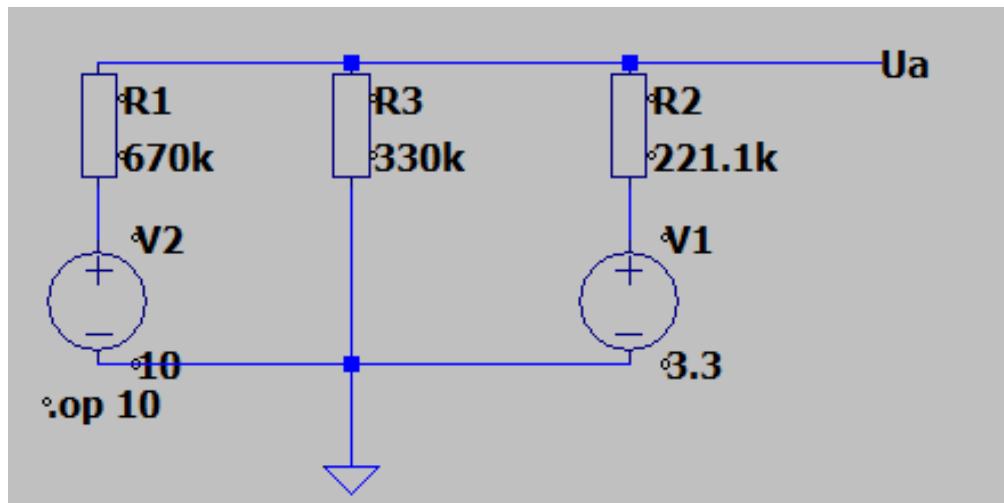


Abbildung 6: Schaltung für  $U_A$  Überprüfung bei 10V

--- Operating Point ---

V(ua) :	3.3	voltage
V(ue) :	10	voltage
V(vin) :	3.3	voltage
I(R1) :	-1e-05	device_current
I(R2) :	0	device_current
I(R3) :	1e-05	device_current
I(V1) :	0	device_current
I(V2) :	-1e-05	device_current

Abbildung 7:  $U_A$  Spannung bei 10V

## 6.4 Berechnung für $\pm 1 \text{ V}$

Gleichungssystem für  $A$  und  $B$ :

Die Grenzfälle werden eingesetzt. Wenn eine Eingangsspannung  $U_E = +1 \text{ V}$  anliegt, ist die Ausgangsspannung  $U_A = 1.1 \text{ V}$ . Wenn  $U_E = -1 \text{ V}$ , dann ist  $U_A = 0 \text{ V}$ .

$$\begin{aligned} U_A &= V_{CC} \cdot A + U_E \cdot B \\ \text{I: } 1.1 &= 3.3 \cdot A + 1 \cdot B \\ \text{II: } 0 &= 3.3 \cdot A - 1 \cdot B \\ \Rightarrow B &= 3.3 \cdot A \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{B einsetzen in Gleichung II: } 1.1 &= 3.3 \cdot A + 3.3 \cdot A \\ 3.3 &= 3.3 \cdot A + 3.3 \cdot A = 6.6 \cdot A \\ \Rightarrow A &= \frac{1.1}{6.6} = \frac{1}{6} \end{aligned}$$

$$\text{A einsetzen in die Formel für B: } B = 3.3 \cdot \frac{1}{6} = 0.55$$

### 6.4.1 Widerstandsberechnung

Bekannte Zusammenhänge:

$$\begin{aligned} I : A &= \frac{R_{13}}{R_{13} + R_2} \\ II : B &= \frac{R_{23}}{R_{23} + R_1} \\ III : R_1 &= 1M - R_3 \end{aligned}$$

**A einsetzen:**

$$\begin{aligned}
 I : \frac{R_{13}}{R_{13} + R_2} &= \frac{1}{6} \\
 R_{13} &= \frac{1}{6}(R_{13} + R_2) \\
 R_{13} &= \frac{1}{6}R_{13} + \frac{1}{6}R_2 \\
 R_{13} - \frac{1}{6}R_{13} &= \frac{1}{6}R_2 \\
 \frac{5}{6}R_{13} &= \frac{1}{6}R_2 \\
 I \Rightarrow R_2 &= 5 \cdot R_{13} = 5 \cdot \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3}
 \end{aligned}$$

**B einsetzen:**

$$\begin{aligned}
 II : \frac{R_{23}}{R_{23} + R_1} &= 0.55 \\
 0.55(R_1 + R_{23}) &= R_{23} \\
 0.55R_1 + 0.55R_{23} &= R_{23} \\
 0.55R_1 &= 0.45R_{23} \\
 R_1 &= \frac{0.45}{0.55} \cdot R_{23} \\
 II \Rightarrow R_1 &= 0.818 \cdot R_{23}
 \end{aligned}$$

**II umschreiben:**

$$R_1 = 0.818 \cdot \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}$$

**III in II:**

$$\begin{aligned}
 1M - R_3 &= 0.818 \cdot \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} && | \cdot (R_2 + R_3) \\
 (1M - R_3)(R_2 + R_3) &= 0.818 \cdot R_2 \cdot R_3 \\
 (1M - R_3)R_2 + (1M - R_3)R_3 &= 0.818 \cdot R_2 \cdot R_3 && | - 0.818 \cdot R_2 \cdot R_3 - R_3(1M - R_3) \\
 R_3(1M - R_3) - 0.818 \cdot R_2 \cdot R_3 &= -R_3(1M - R_3) \\
 R_2(1M - R_3 - 0.818R_3) &= -R_3(1M - R_3) && | / (1M - R_3 - 0.818R_3) \\
 \Rightarrow R_2 &= \frac{-R_3(1M - R_3)}{(1M - R_3 - 0.818R_3)}
 \end{aligned}$$

**III = II:**

$$\frac{-R_3(1M - R_3)}{(1M - R_3 - 0.818R_3)} = 5 \cdot \frac{(1M - R_3) \cdot R_3}{1M} |/(1M - R_3) \cdot R_3$$

$$\begin{aligned} -(1M - R_3 - 0.818R_3) &= \frac{1M}{5} \\ -1M + R_3 + 0.818R_3 &= 200k \\ -1M + 1.818R_3 &= 200k && | + 1M \\ 1.818R_3 &= 1.2M \\ \Rightarrow R_3 &= \frac{1.2M}{1.818} = 660 \text{ k}\Omega \\ \boxed{R_3 = 680 \text{ k}\Omega} \end{aligned}$$

**R<sub>1</sub> und R<sub>2</sub> berechnen:**

$$R_1 = 1M - R_3 = 340 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = \frac{(1M - R_3) \cdot R_3}{1M} = 1,122 \text{ M}\Omega$$

**E24-Näherungen:**

$$\begin{aligned} R_1 &= \boxed{360 \text{ k}\Omega} && (\text{nächster E24-Wert}) \\ R_2 &= \boxed{1,2 \text{ M}\Omega} && (\text{nächster E24-Wert}) \end{aligned}$$

**6.4.2 U<sub>A</sub> prüfen rechnerisch:**

$$\begin{aligned} U_A &= U_E \cdot \frac{R_2 \parallel R_3}{R_1 + (R_2 \parallel R_3)} + V_{CC} \cdot \frac{R_1 \parallel R_3}{R_2 + (R_1 \parallel R_3)} \\ &= 1 \text{ V} \cdot 0.55 + 3.3 \text{ V} \cdot \frac{1}{6} = 1,1 \text{ V} \end{aligned}$$

#### 6.4.3 $U_A$ prüfen mit Simulation:

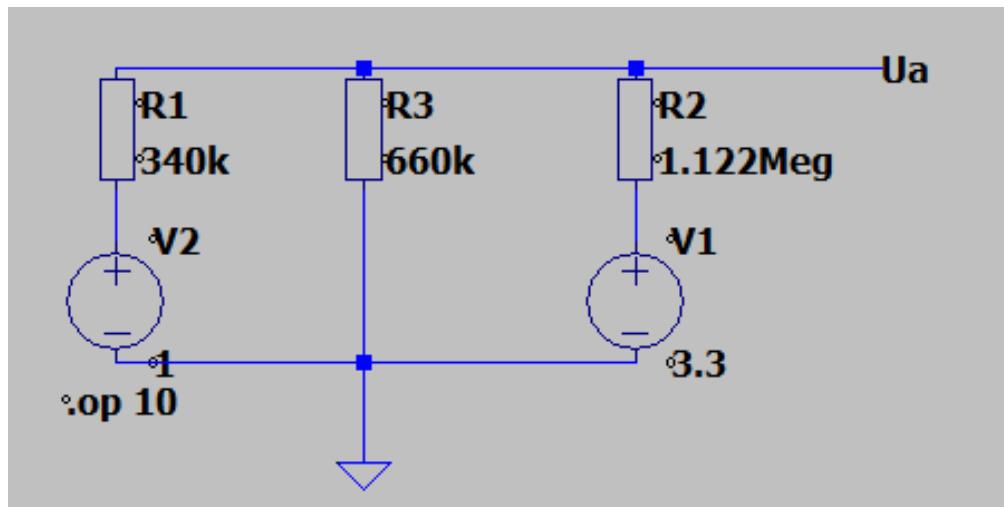


Abbildung 8: Schaltung für  $U_A$  Überprüfung bei 1V

--- Operating Point ---

V(ua) :	1.1	voltage
V(ue) :	1	voltage
V(vin) :	3.3	voltage
I(R1) :	2.94118e-07	device_current
I(R2) :	-1.96078e-06	device_current
I(R3) :	1.66667e-06	device_current
I(V1) :	-1.96078e-06	device_current
I(V2) :	2.94118e-07	device_current

Abbildung 9:  $U_A$  Spannung bei 1V

## 6.5 OPV

### 6.5.1 Nicht-invertierender Verstärker

Zur Anpassung des Signals vom Eingangskanal, welcher eine Spannung von  $\pm 1\text{ V}$  liefert, an die benötigte Eingangsspannung des Mikrocontrollers von  $3,3\text{ V}$  verwenden wir einen nicht-invertierenden Verstärker.

Der nicht-invertierende Verstärker eignet sich hierfür besonders, da er das Eingangssignal phasengleich verstärkt, das heißt ohne Phasenumkehr, und gleichzeitig eine hohe Eingangsimpedanz besitzt. Dadurch wird das Signal kaum belastet, was eine präzise Spannungsverstärkung ermöglicht.

Für unser Signal von  $\pm 1\text{ V}$  benötigen wir eine Verstärkung von etwa  $3,3$ , um das Signal auf den Mikrocontroller-gerechten Pegel von  $\pm 3,3\text{ V}$  anzuheben.

Durch diese Verstärkung ist sichergestellt, dass der Mikrocontroller das Signal im optimalen Messbereich erhält, wodurch sowohl eine präzise Verarbeitung als auch eine maximale Ausnutzung des ADC-Eingangs ermöglicht wird.

### 6.5.2 Verstärker-Schaltung

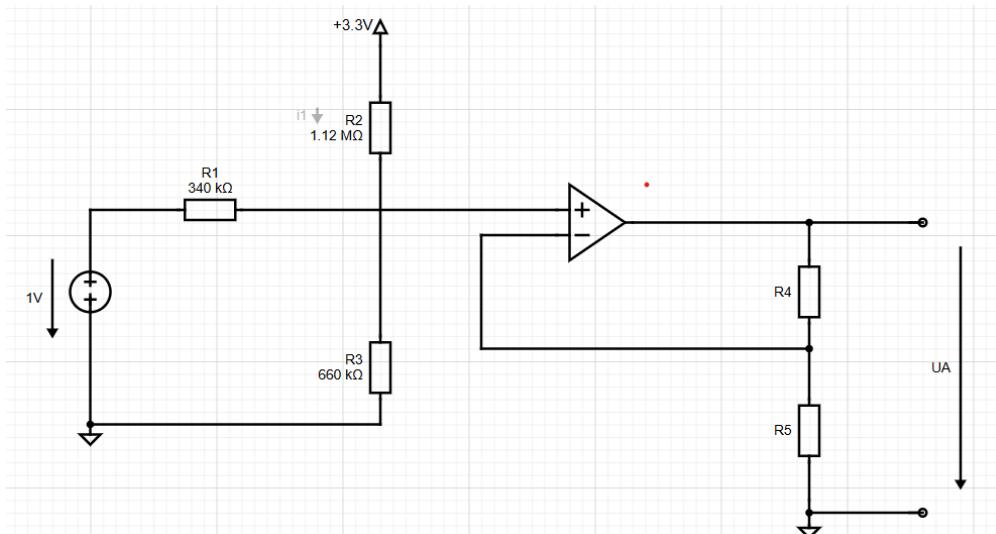


Abbildung 10: Verstärker Schaltung für  $\pm 1\text{ V}$

### 6.5.3 Berechnungen für die Verstärker-Schaltung

Gegeben:

$$-1 \text{ V} \Rightarrow 0 \text{ V}, \\ +1 \text{ V} \Rightarrow 3,3 \text{ V},$$

$$R_1 = 340 \text{ k}\Omega, \\ R_2 = 1,12 \text{ M}\Omega, \\ R_3 = 660,066 \text{ k}\Omega,$$

Angenommen:

$$R_h = 20 \text{ k}\Omega.$$

Für den nichtinvertierenden Verstärker gilt:

$$V = 1 + \frac{R_4}{R_5} = \frac{U_a}{U_e}.$$

Daraus folgt:

$$\frac{U_a}{U_e} - 1 = \frac{R_4}{R_5}.$$

Umgestellt nach  $R_5$ :

$$R_5 = \frac{R_4}{\frac{U_a}{U_e} - 1}.$$

Einsetzen der Werte:

$$R_5 = \frac{20 \text{ k}\Omega}{\frac{3,3}{1} - 1} = \frac{20 \text{ k}\Omega}{2,3} = 8,696 \text{ k}\Omega.$$

$R_5 = 8,7 \text{ k}\Omega$

## 6.6 Vergleichen von Messdaten und Simulationsdaten

### 6.6.1 Gemessen bei $\pm 10\text{ V}$

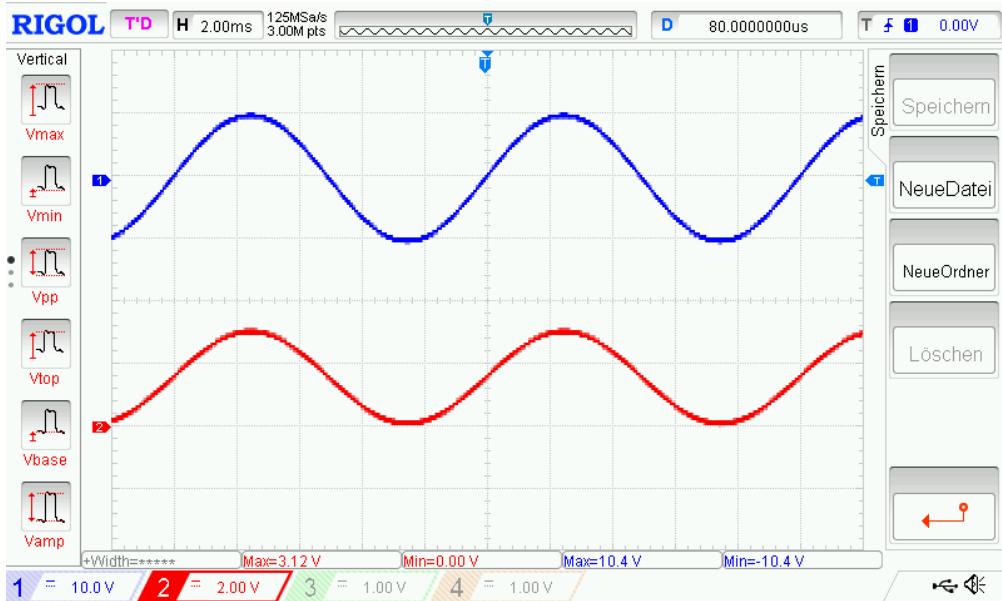


Abbildung 11: Oszilloskop-Signal bei einer Ausgangsspannung von  $\pm 10\text{ V}$

Blau: Eingang

Rot: Ausgang

### 6.6.2 Simulation bei $\pm 10$ V

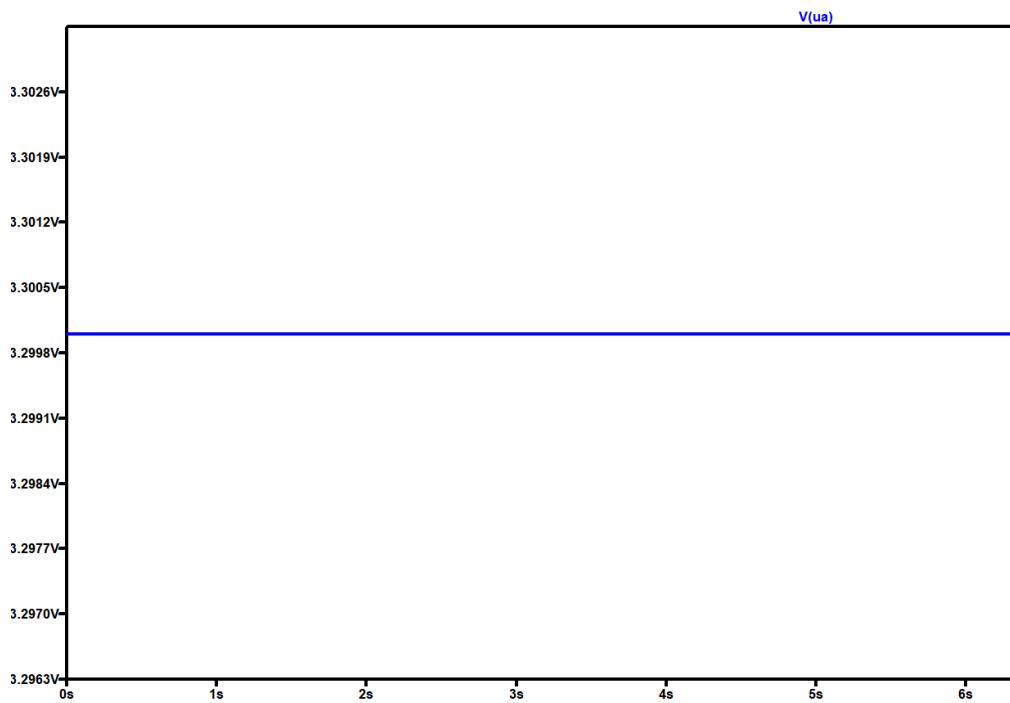


Abbildung 12: Simulations-Signal bei einer Eingangsspannung von  $\pm 10$  V

Die dargestellten Messergebnisse stimmen mit den zuvor durchgeführten Simulationen und Berechnungen überein.

Ergebnis der Berechnung:  $U_A = 3,28\text{V}$

Ergebnis der Simulation:  $U_A = 3,3\text{V}$

Ergebnis der Messung am Oszilloskop:  $U_A = 3,12\text{V}$

### 6.6.3 Schaltung mit $\pm 1$ V

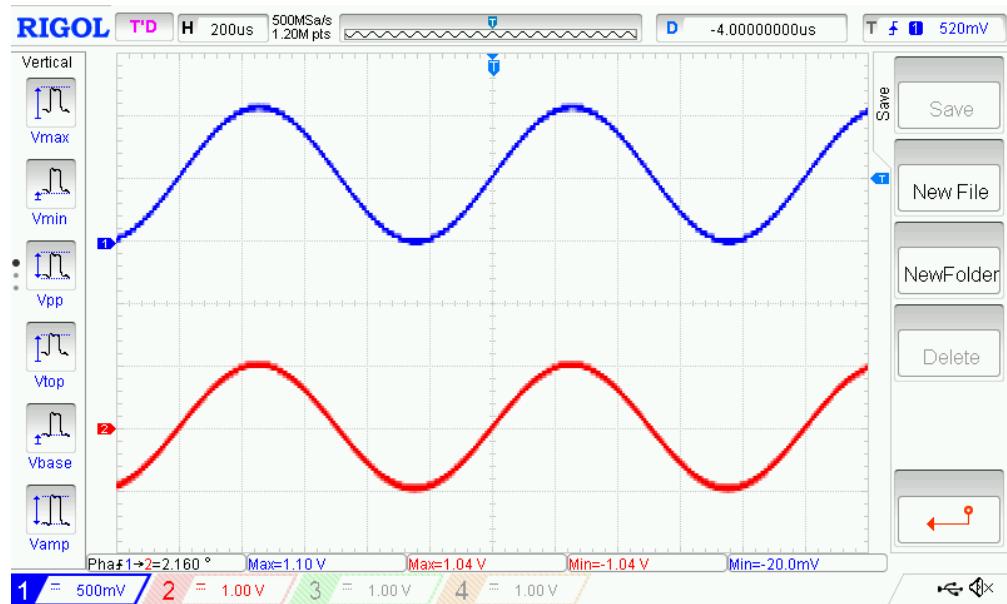


Abbildung 13: Oszilloskop bei  $U_E = \pm 1$  V

Blau: Ausgang    Rot: Eingang

#### 6.6.4 Simulation bei $\pm 1$ V

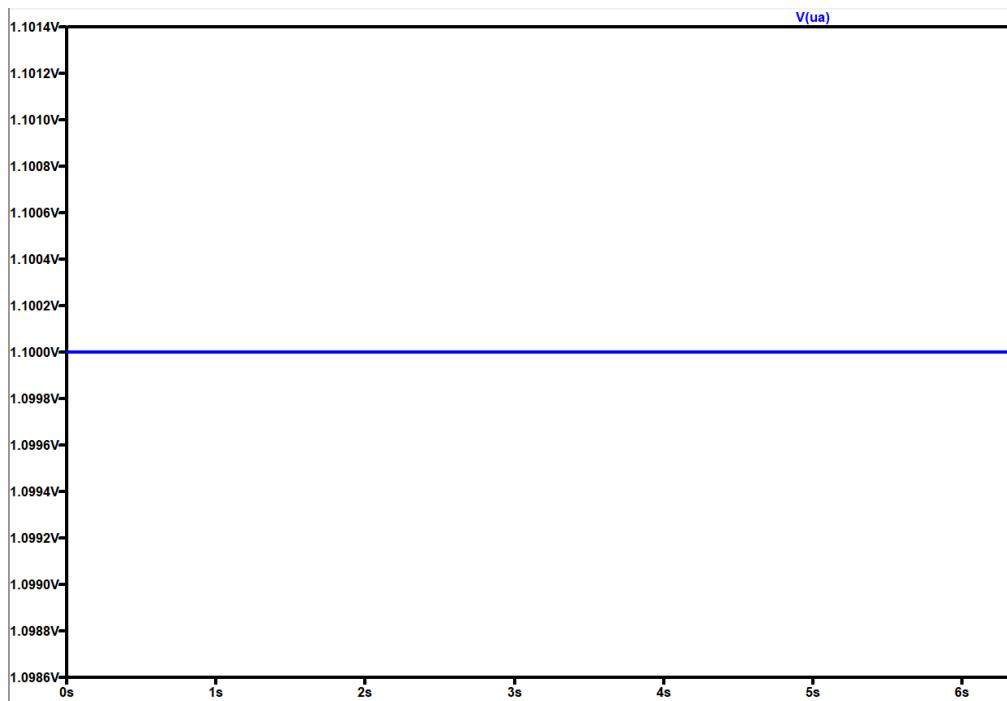


Abbildung 14: Simualtion bei  $U_E = \pm 1$  V

Die dargestellten Messergebnisse stimmen mit den zuvor durchgeföhrten Simulationen und Berechnungen überein.

Ergebnis der Berechnung:  $U_A = 1,1$  V

Ergebnis der Simulation:  $U_A = 1,1$  V

Ergebnis der Messung am Oszilloskop:  $U_A = 1,1$  V

### 6.6.5 Schaltung mit $\pm 1\text{ V}$ und OPV

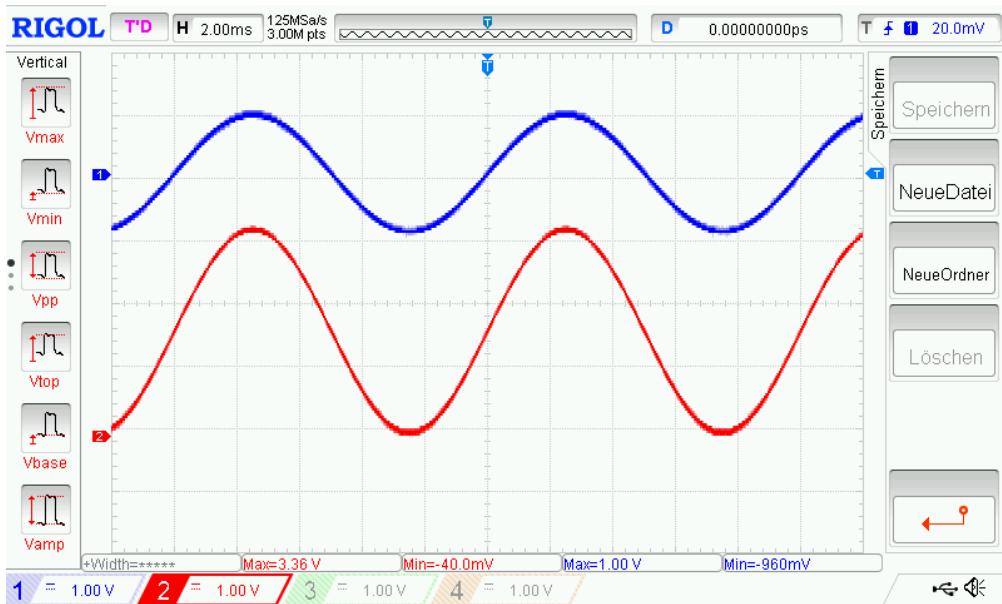


Abbildung 15: Oszilloskop-Signal bei einer Eingangsspannung von  $1,840\text{ V}_{\text{pp}}$

Blau: Eingang

Rot: Ausgang

### 6.6.6 Simulation mit $\pm 1$ V und OPV

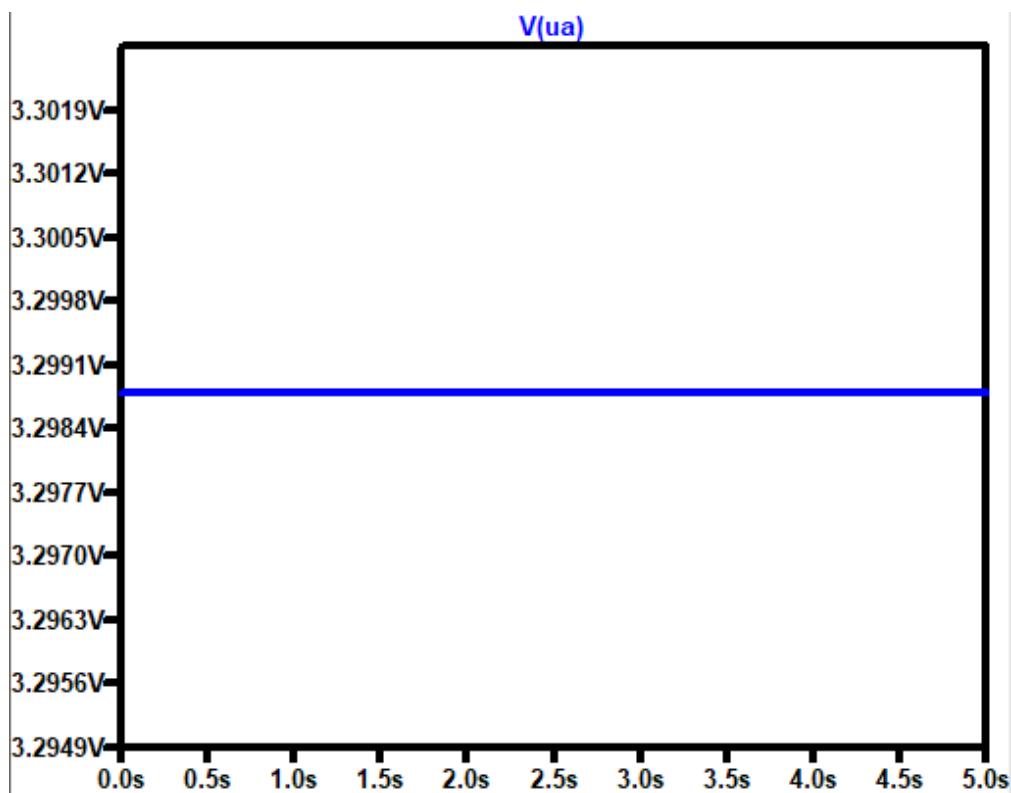


Abbildung 16: Simualtion bei  $U_E = \pm 1$  V mit OPV

Um ein abgeschnittenes Signal am Ausgang  $U_a$  zu vermeiden, speisen wir eine Eingangsspannung von  $1,840 \text{ V}_{\text{pp}}$  vom Funktionsgenerator in das Oszilloskop ein. Der Einsatz eines Operationsverstärkers sorgt dafür, dass das Signal ausreichend verstärkt und verzerrungsfrei dargestellt wird.

### 6.6.7 Schaltung mit $\pm 36$ V

Die Messung mit dem Funktionsgenerator war in diesem Fall nicht möglich, da dieser nur Eingangsspannungen bis maximal  $\pm 20$  V (entspricht  $40$  V *peak-to-peak*) erzeugen kann. Für unsere Anwendung wäre jedoch eine Spannung von  $\pm 36$  V erforderlich, was  $72$  V *peak-to-peak* entspricht.

Ein Ansatz, dieses Problem zu umgehen, bestand darin, die Ausgangsspannung des Funktionsgenerators mithilfe eines Operationsverstärkers (OPV) zu verstärken. Hierfür wurde der MCP6002 verwendet. Allerdings war dies nicht erfolgreich, da dieser OPV lediglich eine Versorgungsspannung von maximal  $6$  V unterstützt und somit nicht in der Lage ist, die erforderliche Ausgangsspannung bereitzustellen.

### 6.6.8 Simulation mit $\pm 36$ V

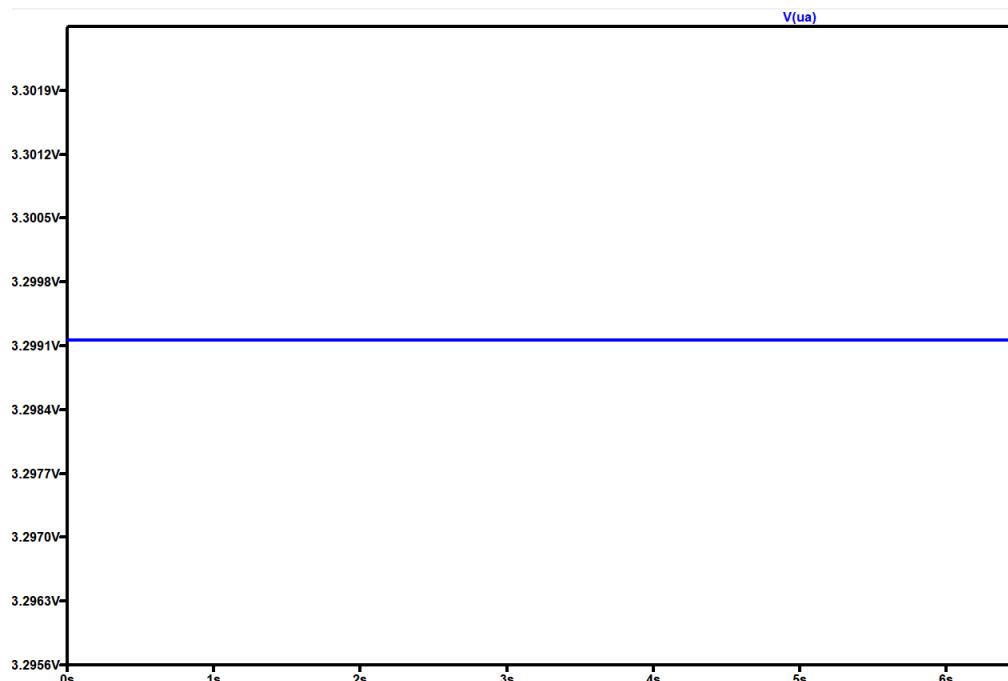


Abbildung 17: Simulation bei  $U_E = \pm 36$  V

## 7 Schaltplan

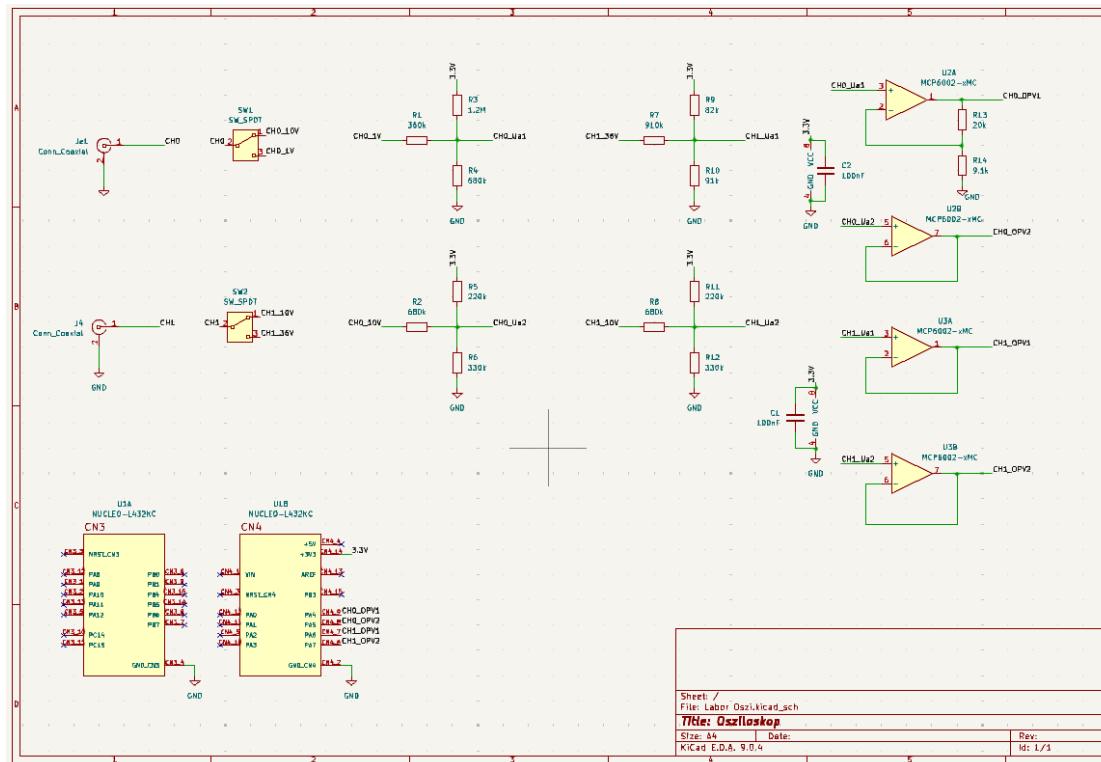


Abbildung 18: Schaltung in KiCad für das Layout

## 7.1 Erklärung des Schaltplans

### 7.1.1 Eingänge

Die zwei Eingänge (Je1 und J4) sind jeweils als koaxiale Anschlüsse (Conn\_Coaxial) ausgelegt und mit den Kanälen beschriftet:

- CH0
- CH1

Diese Eingänge dienen dazu, unterschiedliche Spannungssignale von Messpunkten oder Sensoren aufzunehmen.

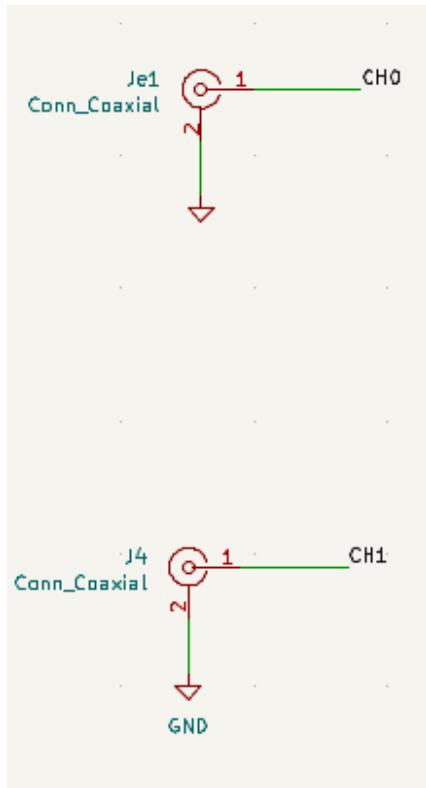


Abbildung 19: koaxiale Anschlüsse

### 7.1.2 Schalter

Mit den Schaltern (SW1 und SW2) kann man zwischen den verschiedenen Eingangsspannungen variieren.

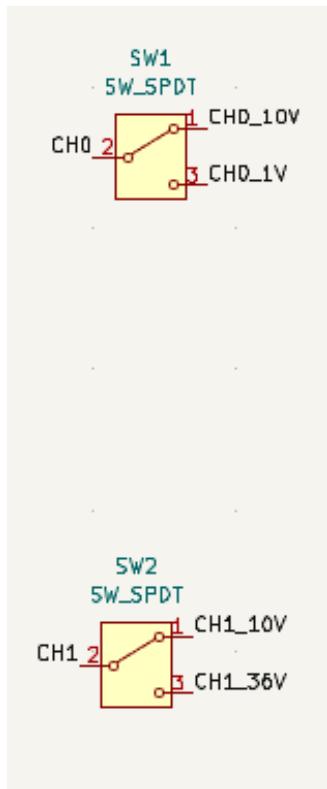


Abbildung 20: Schalter Schaltung

### 7.1.3 Spannungsteiler

Jeder Eingang wird durch einen Spannungsteiler (R1–R14) angepasst, der die hohe Eingangsspannung auf ein niedrigeres, sicheres Spannungsniveau heruntersetzt, das mit dem Mikrocontroller kompatibel ist.

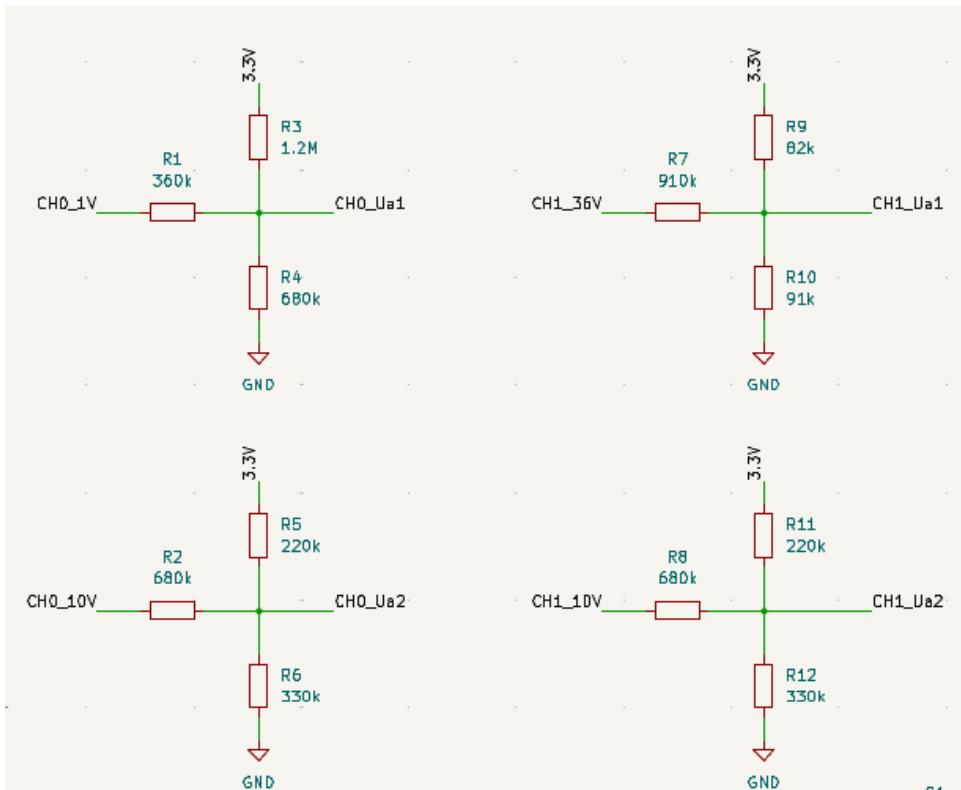


Abbildung 21: Spannungsteiler Schaltung

#### 7.1.4 Kondensatoren

Die Kondensatoren dienen als Buffer zwischen  $V_{cc}$  und GND um das signal nicht zu verfälschen.

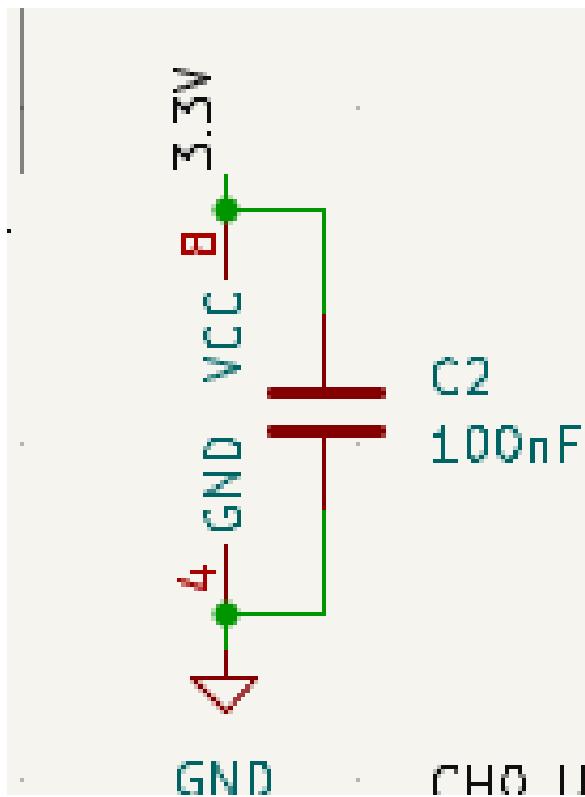


Abbildung 22: Kondensator Schaltung

### 7.1.5 OPV

Für die Signale gibt es je einen Verstärker-Abschnitt mit dem Operationsverstärker MCP6002 (U1A bis U4A). Diese OPVs sind als nicht-invertierende Verstärker geschaltet, um die Signale weiter zu verstärken bzw. zu puffern und an die ADC-Eingänge des Mikrocontrollers anzupassen.

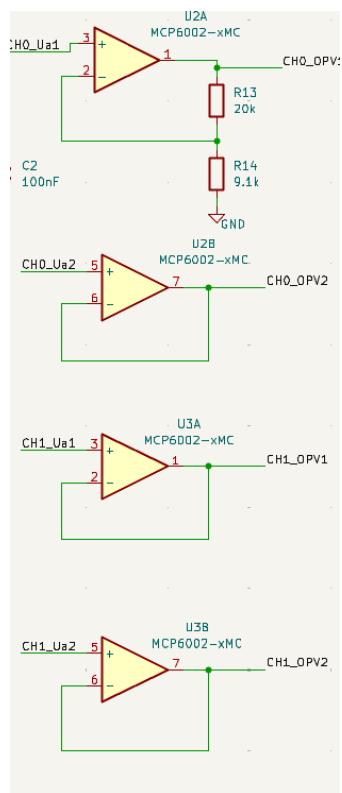


Abbildung 23: OPV Schaltung

### 7.1.6 µC

U5A und U5B sind die beiden Mikrocontroller-Module (NUCLEO-L432KC), welche die analogen Signale von den Verstärkern digitalisieren.

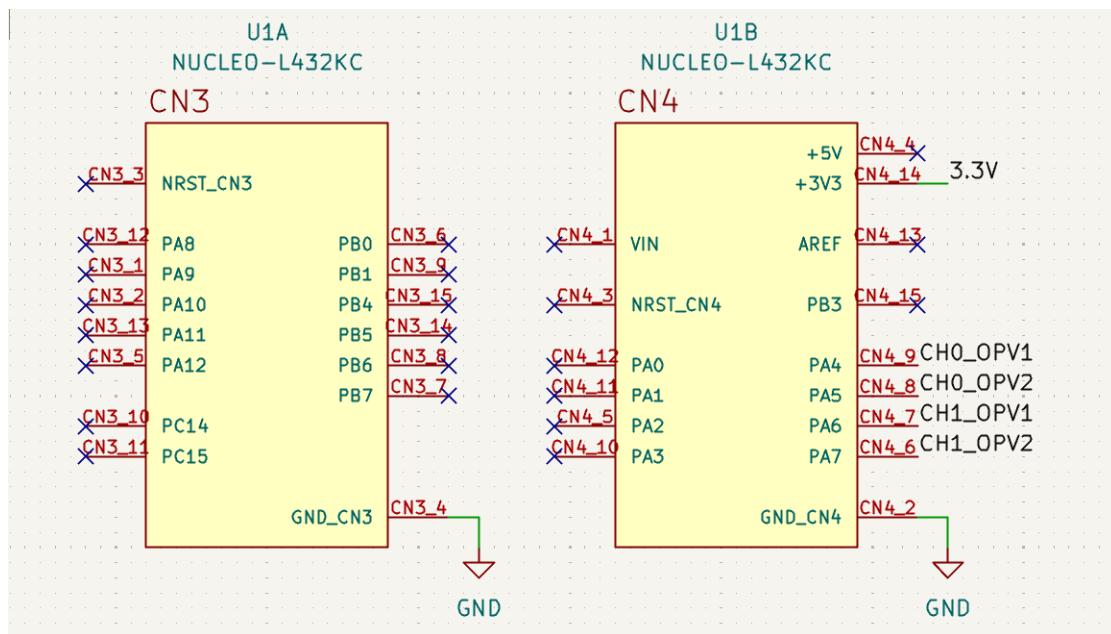


Abbildung 24: µC Schaltung