

Aufbau eines eigenen Oszilloskops

Sonja Schönauer, Nicolas Scherrer
4BHEL

26. September 2025

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	4
2	Theoretische Grundlagen	5
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
3	Aufbau der Grundsaltung	7
4	Spannungsquelle V_{CC} kurzgeschlossen	8
5	Spannungsquelle U_E kurzgeschlossen	9
6	Berechnungen	10
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
7	Schaltplan	31
7.1	Erklärung des Schaltplans	32
7.1.1	Eingänge	32
7.1.2	Schalter	33
7.1.3	Spannungsteiler	34
7.1.4	Kondesatoren	35
7.1.5	OPV	36
7.1.6	μC	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 (μC) mit einem ADC-Eingangsspannungsbereich von 0 V bis $3,3\text{ V}$ aufbereitet werden.

1 Zielsetzung

- Skalierung der drei unterschiedlichen Eingangsspannungsbereiche auf eine Ausgangsspannung U_A (0 V 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, I²C 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 Grundsaltung 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 Grundsaltung

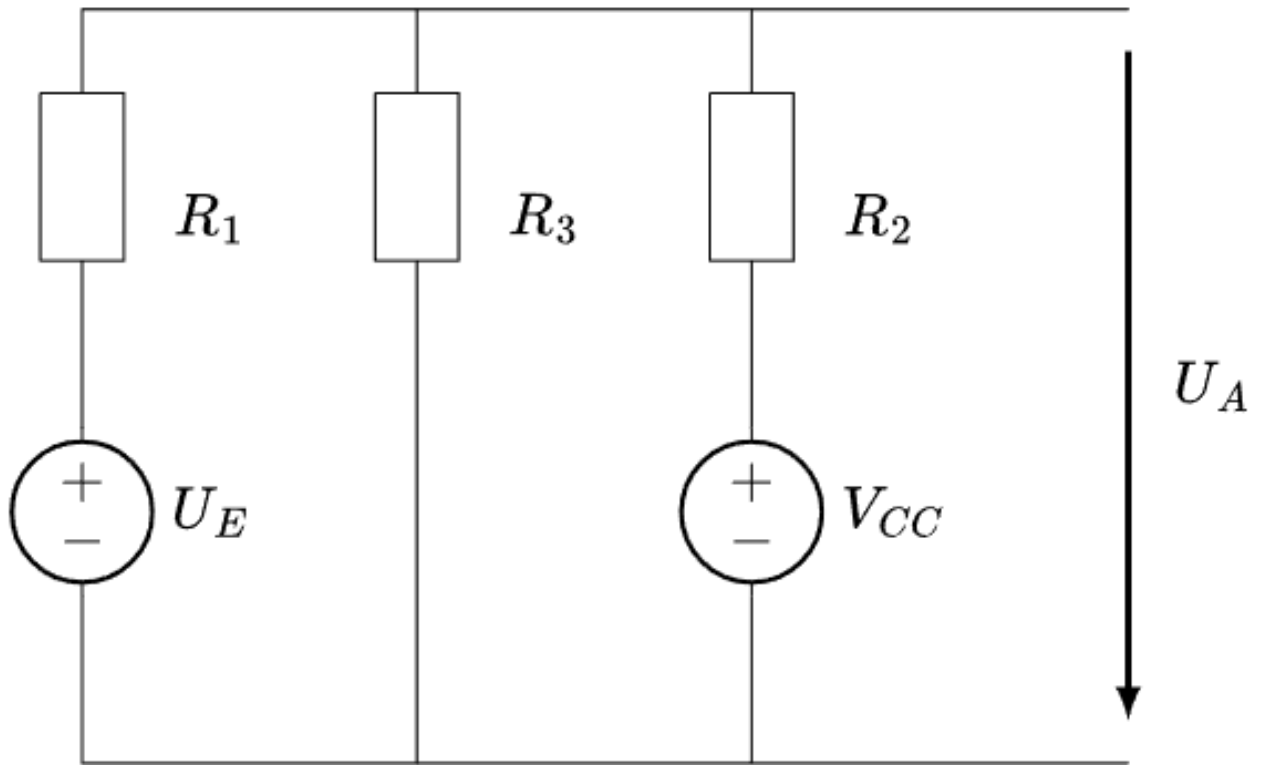


Abbildung 1: Grundsaltung

4 Spannungsquelle V_{CC} kurzgeschlossen

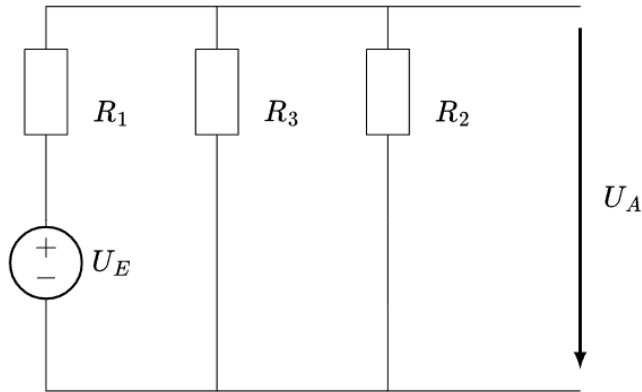


Abbildung 2: Spannungsquelle V_{CC} kurzgeschlossen

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

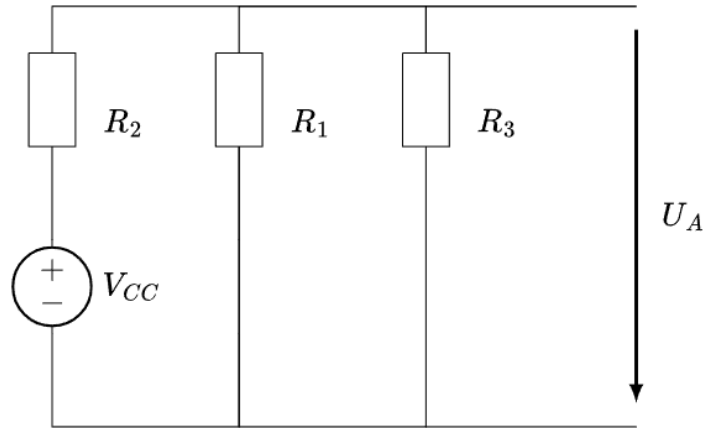


Abbildung 3: Spannungsquelle U_E kurzgeschlossen

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 :

$$U'_A = U_E \cdot B$$

$$U''_A = V_{CC} \cdot A$$

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

6.2 Berechnung für $\pm 36\text{ V}$

Gleichungssystem für A und B :

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

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

$$\text{I: } 3.3 = 3.3 \cdot A + 36 \cdot B$$

$$\text{II: } 0 = 3.3 \cdot A - 36 \cdot B$$

$$\Rightarrow 3.3 \cdot A = 36 \cdot B$$

$$\Rightarrow B = \frac{3.3}{36} \cdot A = 0.0917 \cdot A$$

$$\text{B einsetzen in Gleichung I: } 3.3 = 3.3 \cdot A + 36 \cdot 0.0917 \cdot A$$

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

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

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

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:

$$1M - R_3 = 20.83 \cdot \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \quad | (R_2 + R_3)$$

$$(1M - R_3)(R_2 + R_3) = 20.83 R_2 R_3$$

$$(1M - R_3)R_2 + (1M - R_3)R_3 = 20.83 R_2 R_3 \quad | - 20.83 R_2 R_3$$

$$R_2(1M - R_3) + R_3(1M - R_3) - 20.83 R_2 R_3 = 0$$

$$R_2(1M - R_3 - 20.83 R_3) + R_3(1M - R_3) = 0 \quad | - R_3(1M - R_3)$$

$$R_2(1M - R_3 - 20.83 R_3) = -R_3(1M - R_3) \quad | / (1M - R_3 - 20.83 R_3)$$

$$R_2 = \frac{-R_3(1M - R_3)}{(1M - R_3) - 20.83 R_3}$$

III=II

$$\frac{-R_3(1M - R_3)}{(1M - R_3) - 20.83 R_3} = \frac{(1M - R_3) R_3}{1} M$$

$$-(1M - R_3 - 20.83 R_3) = 1M$$

$$-1M + R_3 + 20.83 R_3 = 1M$$

$$-1M + 21.83 R_3 = 1M \quad | + 1M$$

$$21.83 R_3 = 2M \quad | \div 21.83$$

$$R_3 = \frac{2M}{21.83} \approx 91.62 \text{ k}\Omega$$

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

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

$$R_1 = 1 \text{ M}\Omega - 91 \text{ k}\Omega = 909 \text{ k}\Omega \quad (\text{E24-Näherung: } \boxed{910 \text{ k}\Omega})$$

$$R_2 = \frac{(1 \text{ M}\Omega - 91 \text{ k}\Omega) \cdot 91 \text{ k}\Omega}{1 \text{ M}\Omega} = 82,81 \text{ k}\Omega \quad (\text{E24-Näherung: } \boxed{82 \text{ k}\Omega})$$

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:

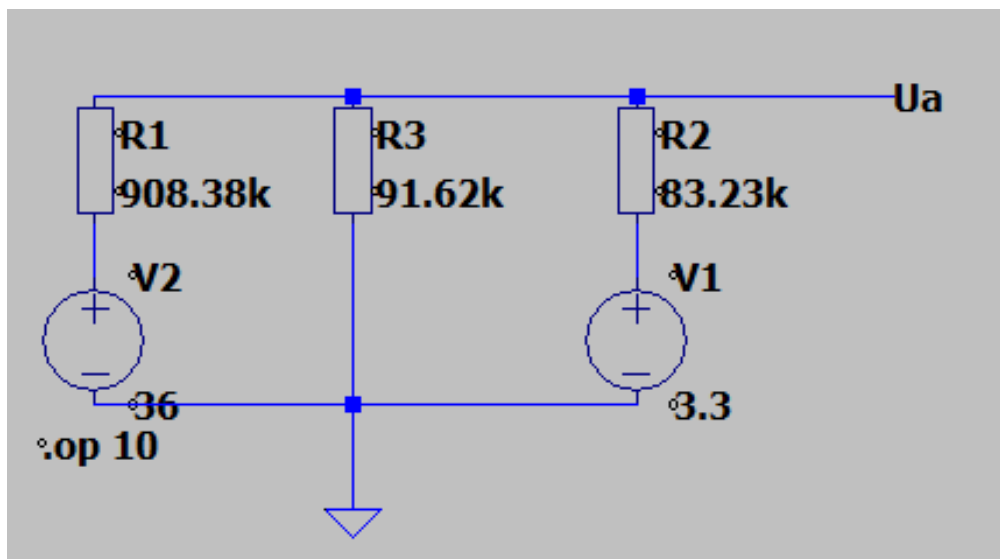


Abbildung 4: Schaltung für U_A Überprüfung bei 36V

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

Gleichungssystem für A und B :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

6.3.1 Widerstandsberechnung

Bekannte Zusammenhänge:

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

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

$$III : R_1 = 1M - R_3$$

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:

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

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

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:

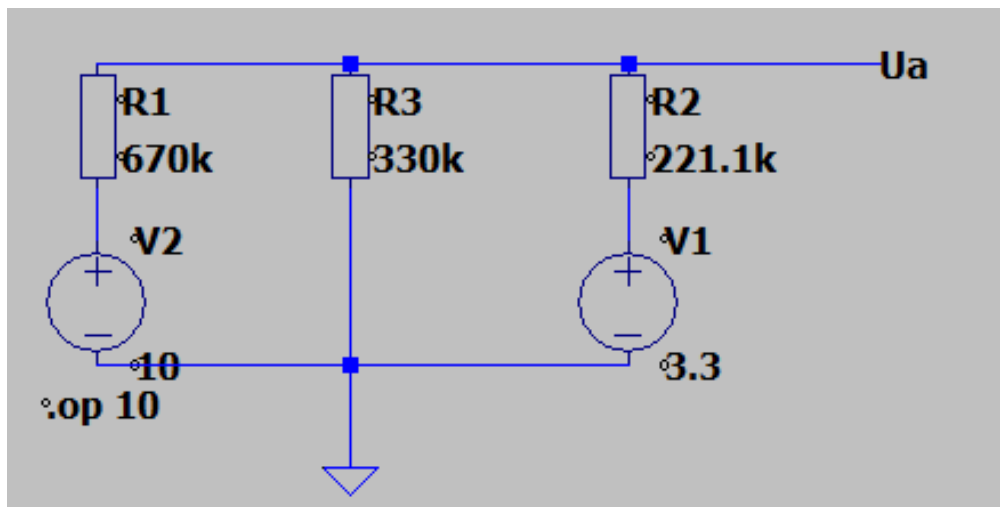


Abbildung 6: Schaltung für U_A Überprüfung bei 10V

```
--- 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 $U_A = 0\text{ V}$.

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

$$\text{I: } 1.1 = 3.3 \cdot A + 1 \cdot B$$

$$\text{II: } 0 = 3.3 \cdot A - 1 \cdot B$$

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

$$\text{B einsetzen in Gleichung II: } 1.1 = 3.3 \cdot A + 3.3 \cdot A$$

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

$$\Rightarrow A = \frac{1.1}{6.6} = \frac{1}{6}$$

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

6.4.1 Widerstandsberechnung

Bekannte Zusammenhänge:

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

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

$$III : R_1 = 1M - R_3$$

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:

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

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

$$-1M + R_3 + 0.818 R_3 = 200k$$

$$-1M + 1.818 R_3 = 200k \quad | + 1M$$

$$1.818 R_3 = 1.2M$$

$$\Rightarrow R_3 = \frac{1.2M}{1.818} = 660 \text{ k}\Omega$$

$$\boxed{R_3 = 680 \text{ k}\Omega}$$

R₁ und R₂ 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:

$$R_1 = \boxed{360 \text{ k}\Omega} \quad (\text{nächster E24-Wert})$$

$$R_2 = \boxed{1,2 \text{ M}\Omega} \quad (\text{nächster E24-Wert})$$

6.4.2 U_A prüfen rechnerisch:

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

6.4.3 U_A prüfen mit Simulation:

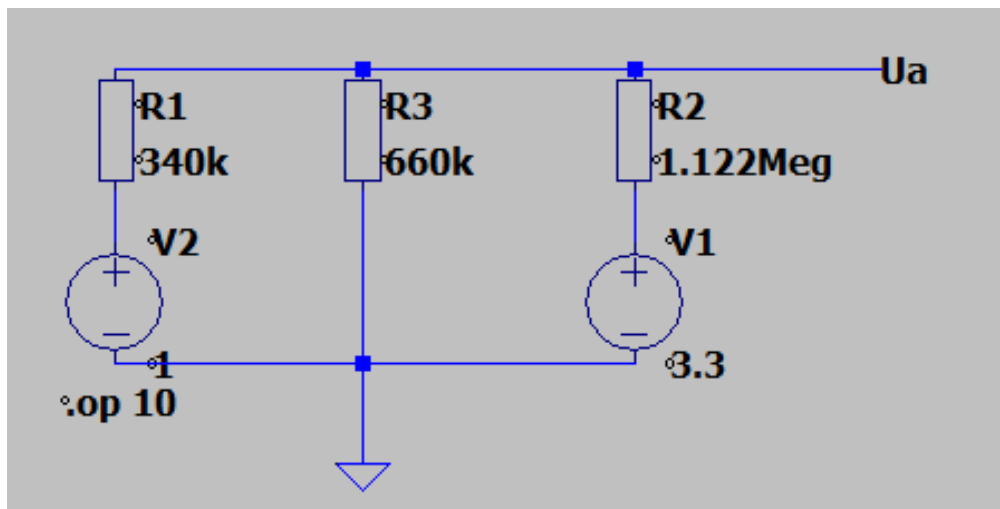


Abbildung 8: Schaltung für U_A Überprüfung bei 1V

--- 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

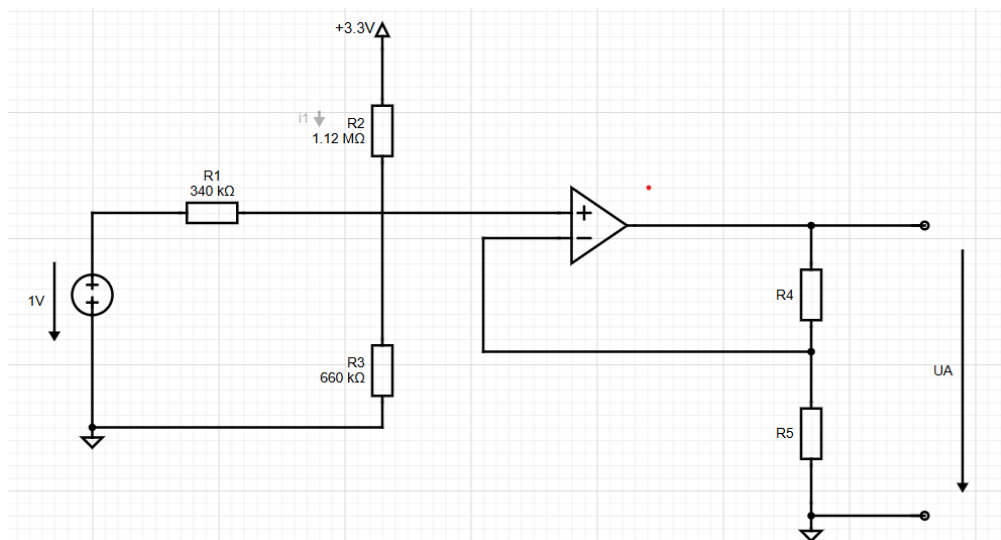


Abbildung 10: Verstärker Schaltung für $\pm 1\text{ V}$

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:

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

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

6.6 Vergleichen von Messdaten und Simulationsdaten

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

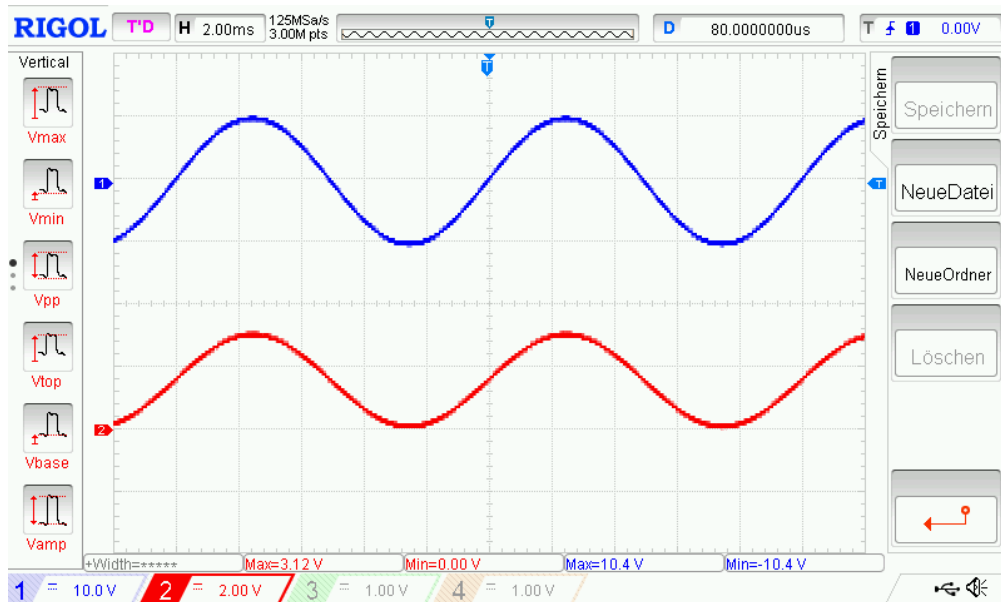


Abbildung 11: Oszilloskop-Signal bei einer Ausgangsspannung von $\pm 10\text{ V}$

Blau: Eingang

Rot: Ausgang

6.6.2 Simulation bei $\pm 10\text{ V}$

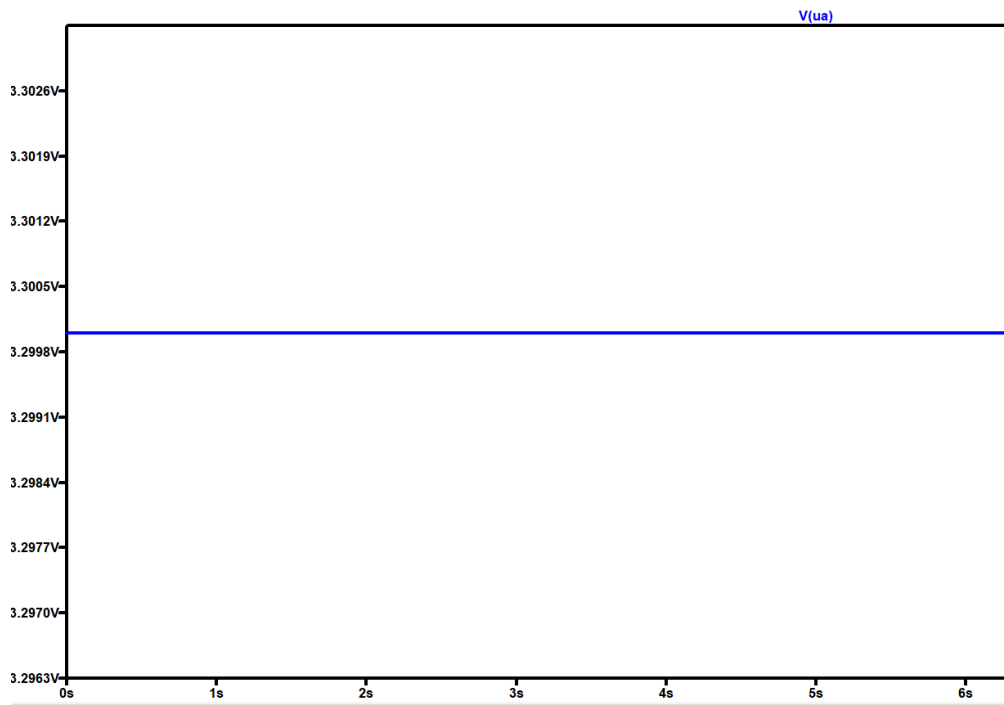


Abbildung 12: Simulations-Signal bei einer Eingangsspannung von $\pm 10\text{ V}$

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 $\pm 1\text{ V}$

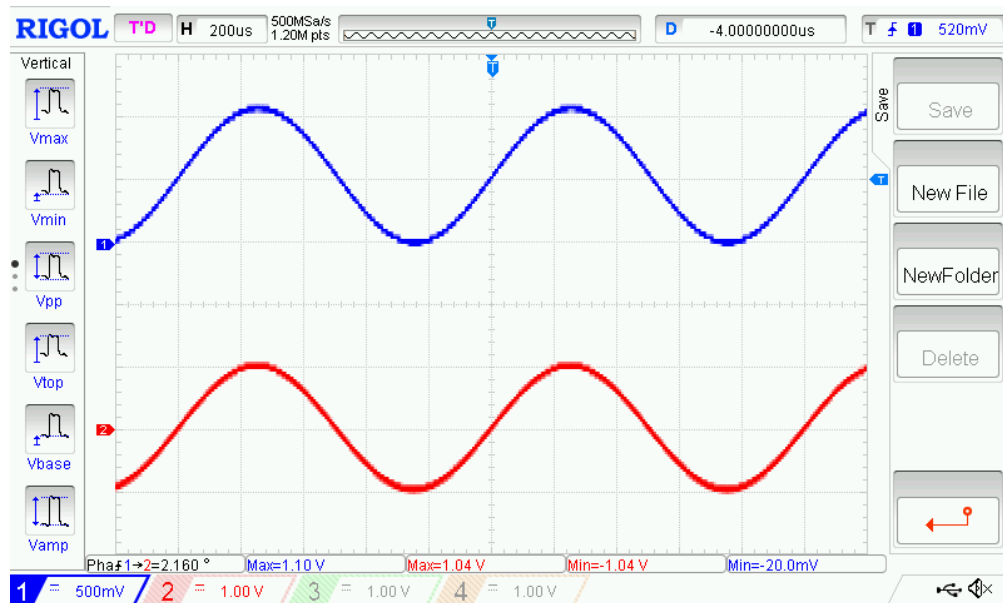


Abbildung 13: Oszilloskop bei $U_E = \pm 1 \text{ V}$

Blau: Ausgang

Rot: Eingang

6.6.4 Simulation bei $\pm 1\text{ V}$

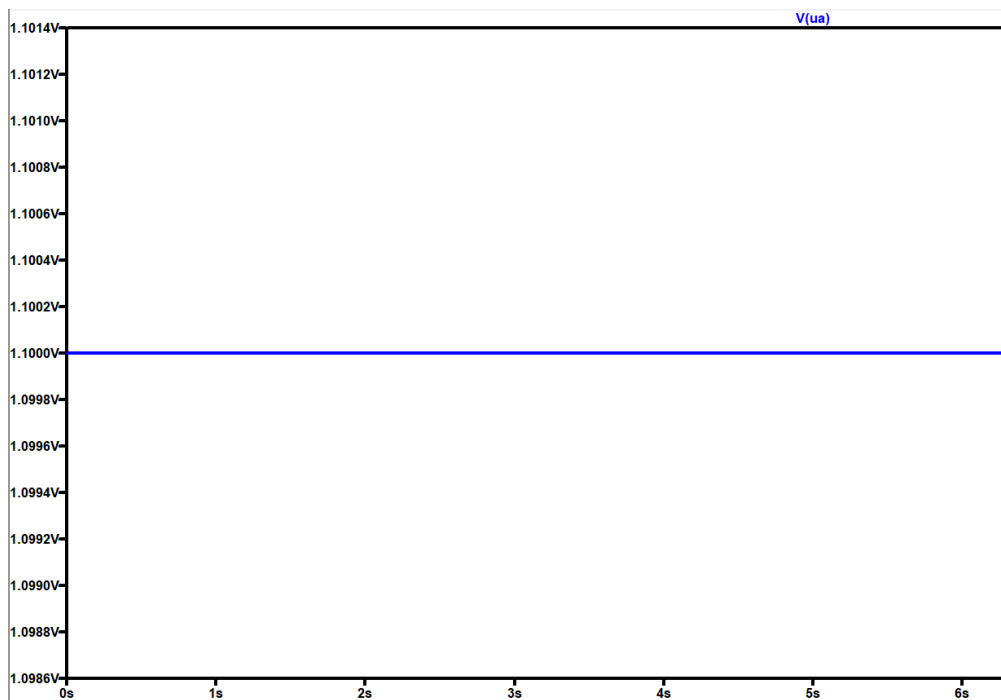


Abbildung 14: Simulation bei $U_E = \pm 1\text{ V}$

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

Ergebnis der Berechnung: $U_A = 1,1\text{ V}$

Ergebnis der Simulation: $U_A = 1,1\text{ V}$

Ergebnis der Messung am Oszilloskop: $U_A = 1,1\text{ V}$

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

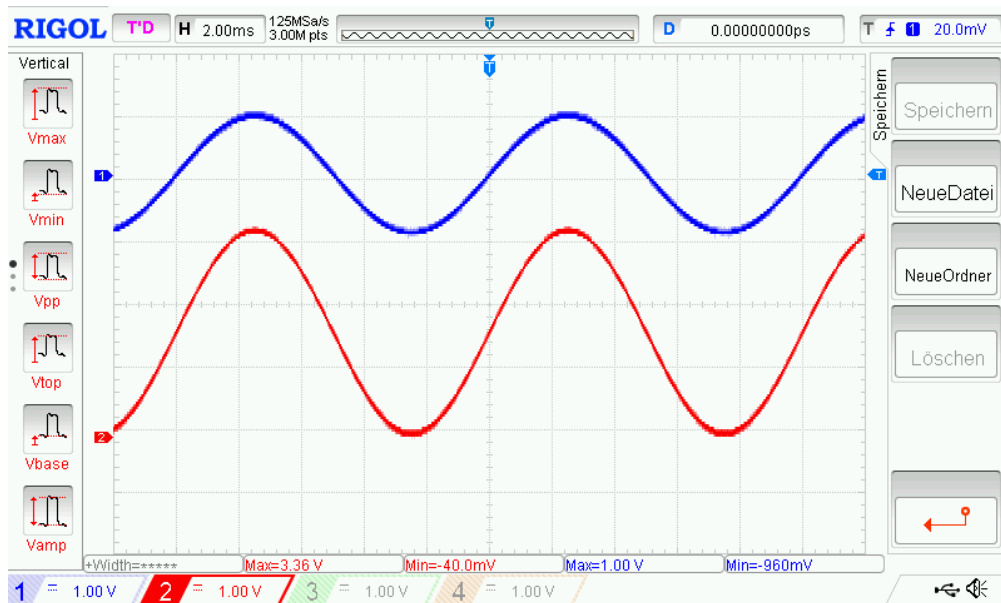


Abbildung 15: Oszilloskop-Signal bei einer Eingangsspannung von $1,840\text{ V}_{pp}$

Blau: Eingang

Rot: Ausgang

6.6.6 Simulation mit $\pm 1\text{ V}$ und OPV

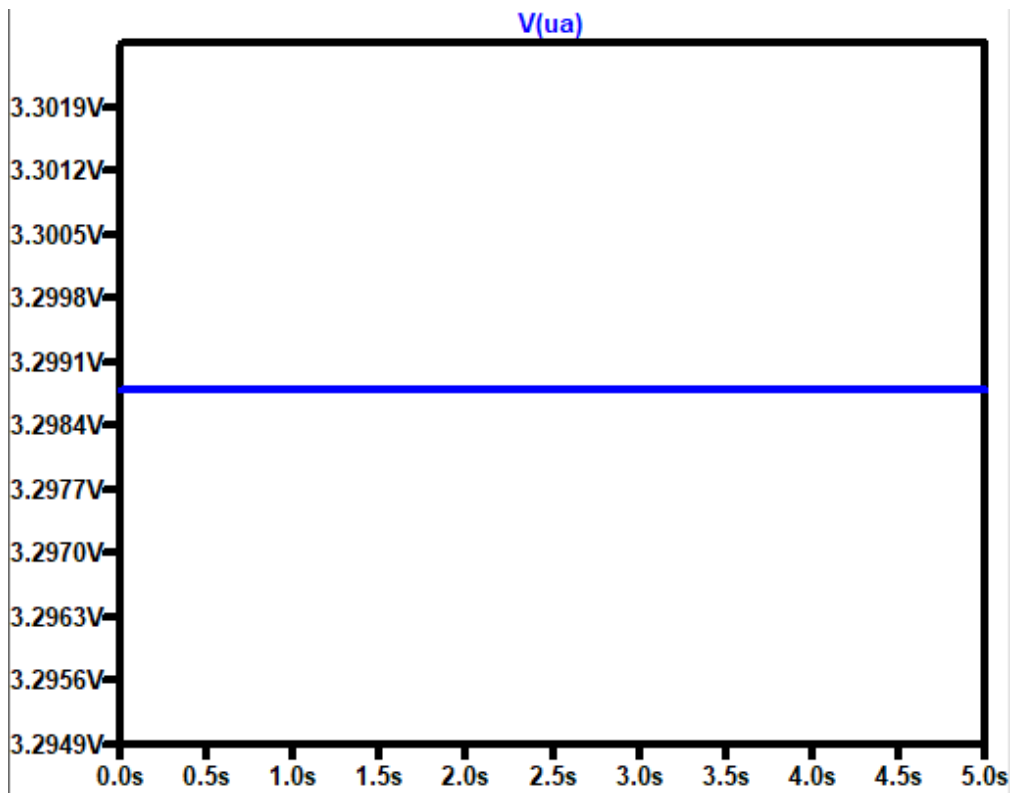


Abbildung 16: Simulation bei $U_E = \pm 1\text{ V}$ mit OPV

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 $\pm 36\text{ V}$

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

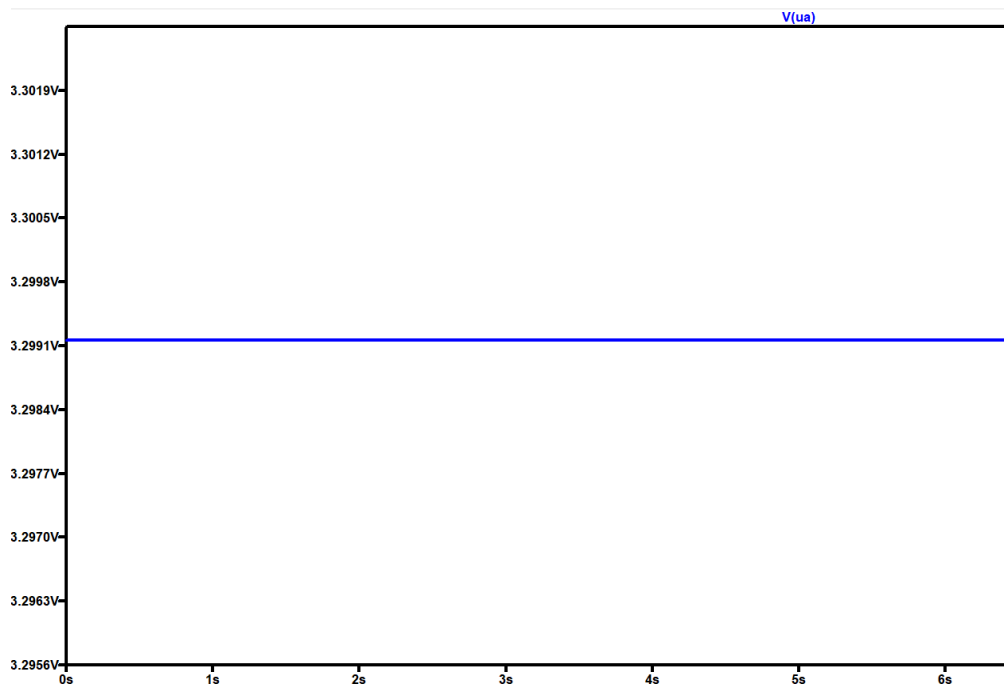


Abbildung 17: Simulation bei $U_E = \pm 36\text{ V}$

7 Schaltplan

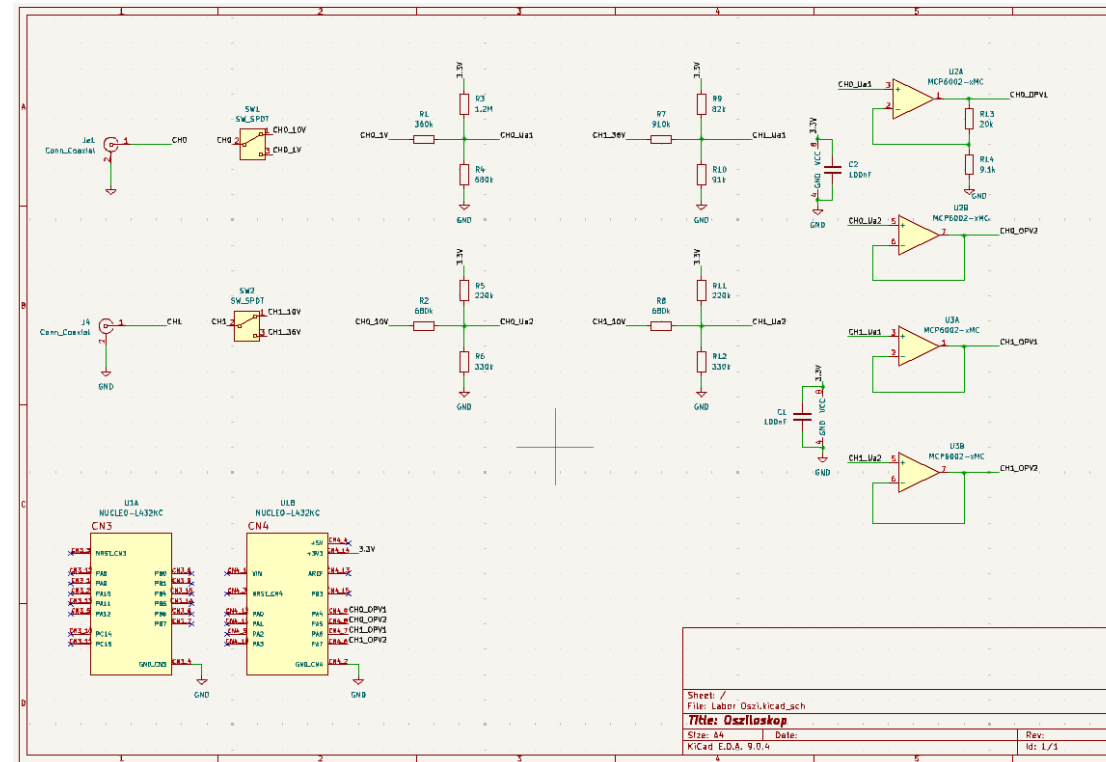


Abbildung 18: Schaltung in KiCad für das Layout

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.

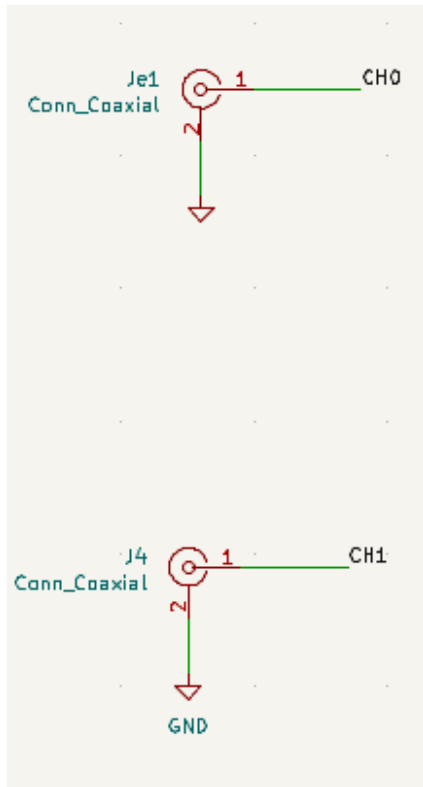


Abbildung 19: koaxiale Anschlüsse

7.1.2 Schalter

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

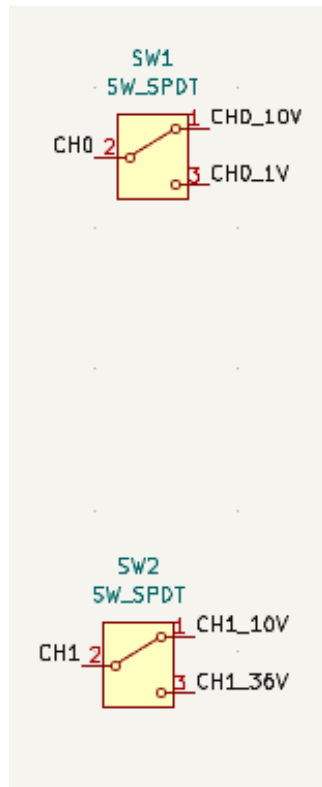


Abbildung 20: Schalter Schaltung

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.

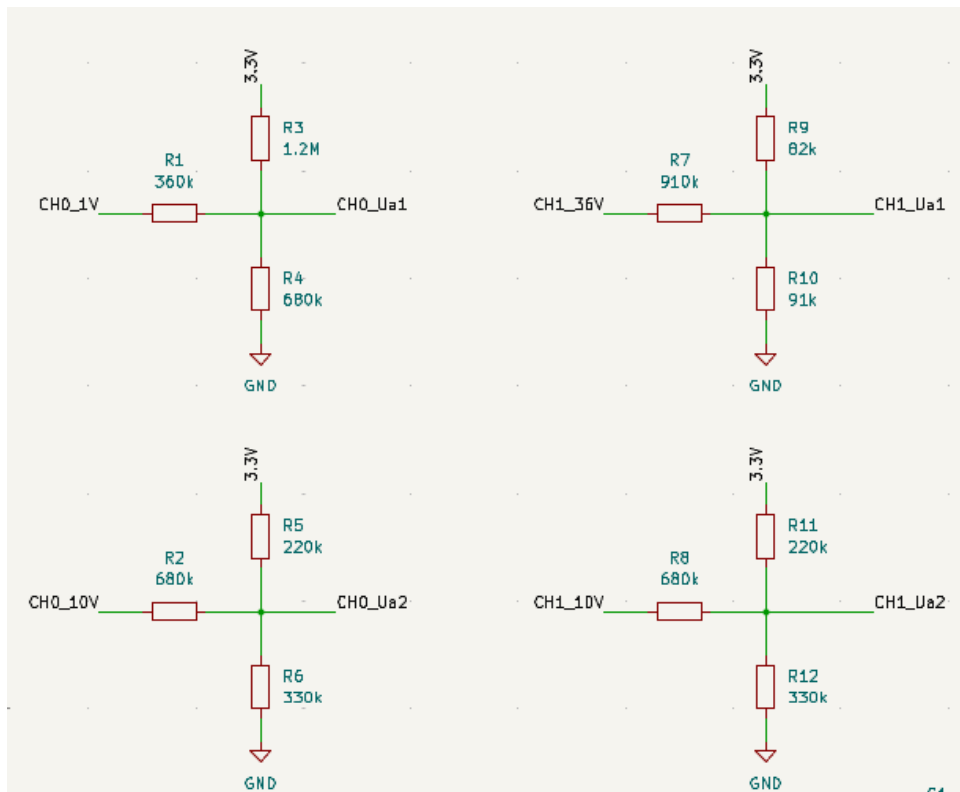


Abbildung 21: Spannungsteiler Schaltung

7.1.4 Kondensatoren

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

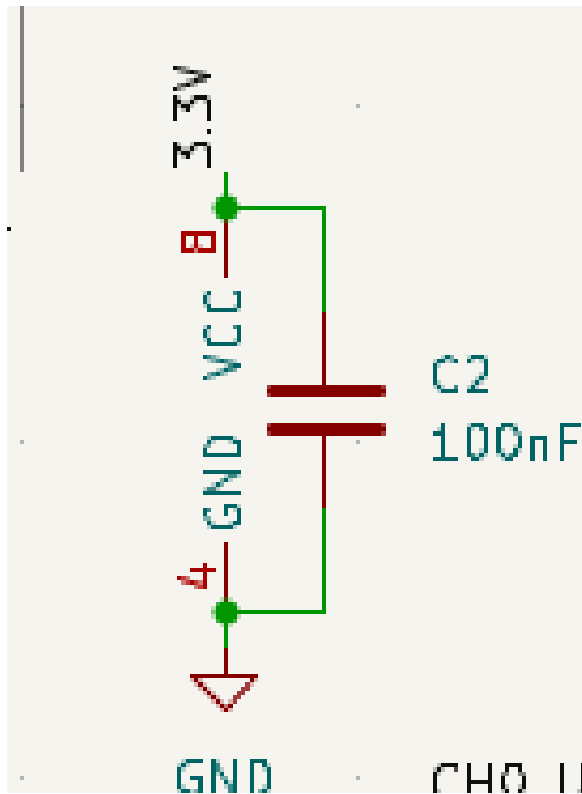


Abbildung 22: Kondensator Schaltung

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.

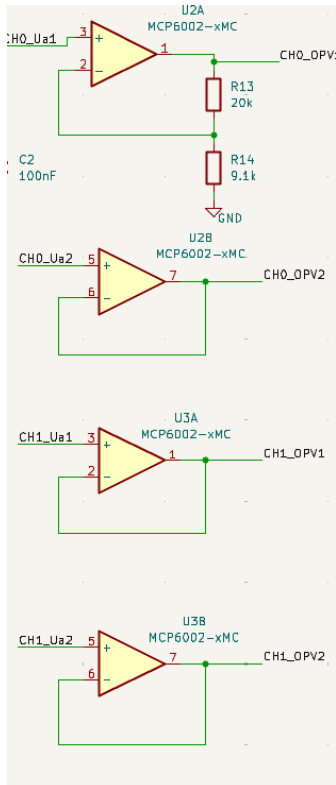


Abbildung 23: OPV Schaltung

7.1.6 μ C

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

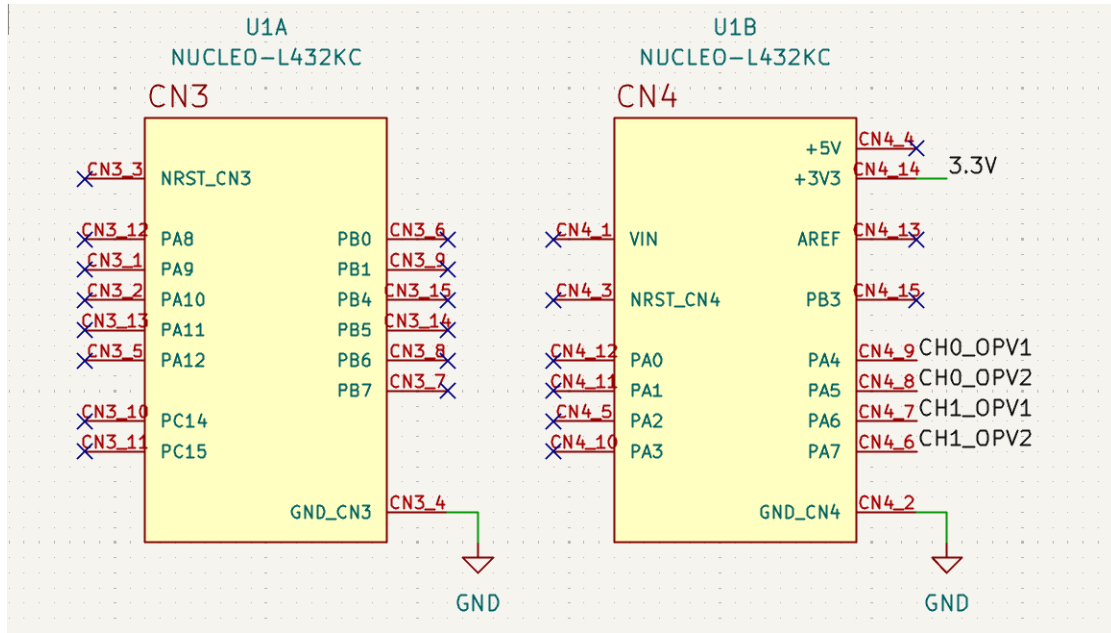


Abbildung 24: μ C Schaltung