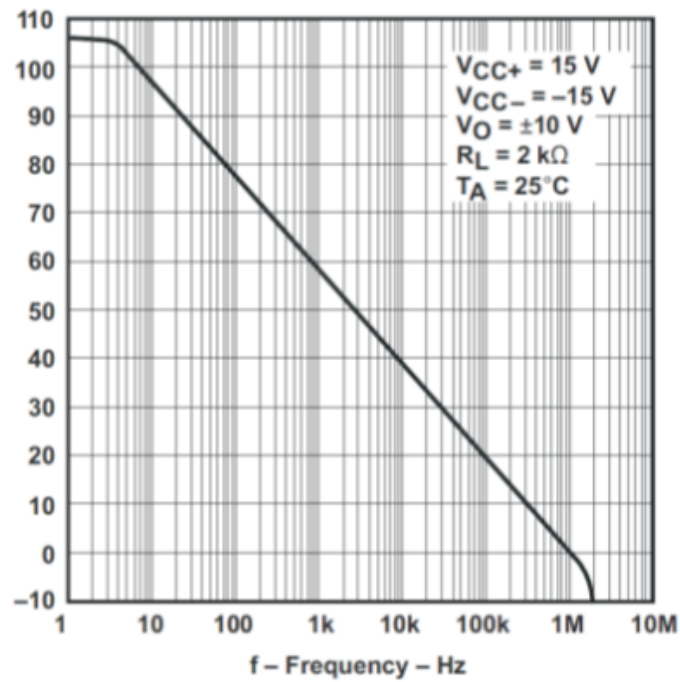


Versuch 242 - Op-Amp

PAP 2.2, [1]

04.12.2024



[2]

Teilnehmender Student: **Jonathan Rodemers**

Gruppe des Teilnehmenden: 1

Kurs:

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Motivation | 1 |
| 1.2 | Messverfahren | 1 |
| 1.3 | Grundlagen aus der Physik | 1 |
| 2 | Durchführung | 3 |
| 2.1 | Messprotokoll | 3 |
| 3 | Auswertung | 5 |
| 3.1 | Bestimmung der Betriebsverstärkung | 5 |
| 3.2 | Frequenzgänge des Op-Amps | 6 |
| 3.3 | Impulsverstärkung | 7 |
| 4 | Zusammenfassung und Diskussion | 8 |
| 5 | Anhang | 9 |
| | Quellen- und Literaturverzeichnis | 12 |

1. Einleitung

1.1 Motivation

Insbesondere bei Messen in den Naturwissenschaften sind oft sehr kleine (Spannung-)Signale zu erfassen, die eine Verstärkung erfordern, um sie quantitativ auswerten zu können. Hierfür werden Operationsverstärker eingesetzt, die durch gezielte Beschaltung als lineare Verstärker mit definierten Eigenschaften fungieren. In diesem Experiment wird der Operationsverstärker 741 untersucht, um grundlegende Eigenschaften von Verstärkerschaltungen zu verstehen.

1.2 Messverfahren

Das Experiment umfasst mehrere Messungen zur Charakterisierung eines invertierenden Verstärkers. Hierzu werden die folgenden Messgeräte und Bauteile verwendet:

1. **Operationsverstärker** $\mu\text{A} 741$ als zentrales Verstärkerelement.
2. **Signalgenerator** zur Einspeisung sinusförmiger Signale.
3. **Oszilloskop** zur Messung von Ein- und Ausgangsspannung.
4. **Widerstände und Kondensatoren** zur Einstellung der Verstärkung und der Frequenzcharakteristik.

Durchvariation der Eingangsspannung und der Gegenkopplungen werden die Verstärkung sowie der Frequenzgang des Verstärkers bestimmt. Zusätzlich wird die Impulsverarbeitung untersucht, indem ein Rechtecksignal als Eingangssignal genutzt wird.

1.3 Grundlagen aus der Physik

Zum Verständniss braucht man Kenntniss der Kirchhoffschen Gesetzen und der Theorie der elektrischen Netzwerke. Im Speziellen werden für den invertierenden Verstärker die folgenden Zusammenhänge genutzt:

- **Knotenregel von Kirchhoff am invertierenden Eingang:**

$$I_1 + I_2 - I_e = 0 \quad (1.1)$$

Da der Eingangsstrom eines idealen Operationsverstärkers vernachlässigbar ist ($I_e \approx 0$), folgt:

$$\frac{U_1 - U_e}{R_1} + \frac{U_a - U_e}{R_2} = 0 \quad (1.2)$$

- **Verstärkungsformel des invertierenden Verstärkers:**

$$V' = \frac{U_a}{U_1} = -\frac{R_g}{R_e} \quad (1.3)$$

Hierbei ist R_g der Gegenkopplungswiderstand und R_e der Eingangswiderstand.

- **Frequenzabhängigkeit der Leerlaufverstärkung:** Die Leerlaufverstärkung des Operationsverstärkers ist umgekehrt proportional zur Frequenz, was durch das Bodediagramm dargestellt werden kann.

- **Einfluss der Gegenkopplung auf die Verstärkung:** Durch Gegenkopplung wird die Verstärkung stabilisiert und die Frequenzabhängigkeit verbessert. Mit einem zusätzlichen Kondensator im Gegenkopplungsweig kann ein Tiefpassfilter realisiert werden.

Durch die experimentelle Bestimmung der Verstärkung und des Frequenzgangs werden die theoretischen Zusammenhänge überprüft und anschließend mit den erwarteten Werten verglichen.

2. Durchführung

2.1 Messprotokoll

Jonathan Rodemanns
 Manuel Sargrafner

Maximilian
 Versuch 242

18.02.25

Materialien

- Operationsverstärker - op 141 (mit Brücking)
- Peak Tech
- Tektronix TDS1072 Zweikanal Osz.

Aufgabe 1

Skizze:

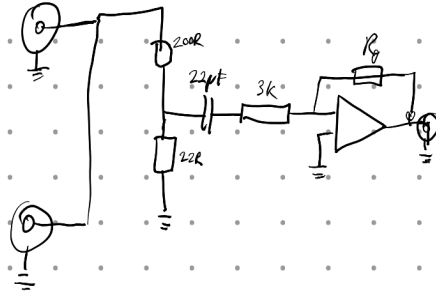
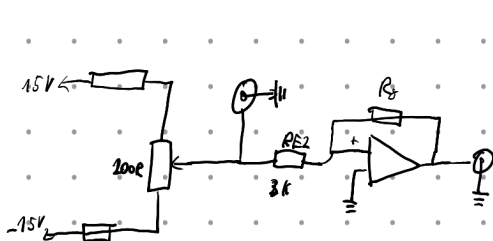


Tabelle 1 $R_g = 48,7 \text{ k}\Omega$

Null

| | | | | | | |
|------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| Eingangsspannung | $(-250 \pm 6) \text{ mV}$ | $(-200 \pm 6) \text{ mV}$ | $(-150 \pm 6) \text{ mV}$ | $(-100 \pm 6) \text{ mV}$ | $(-50 \pm 6) \text{ mV}$ | $(0 \pm 0,6) \text{ mV}$ |
| Ausgangsspannung | $(4,23 \pm 0,03) \text{ V}$ | $(3,40 \pm 0,03) \text{ V}$ | $(2,49 \pm 0,03) \text{ V}$ | $(1,80 \pm 0,03) \text{ V}$ | $(0,95 \pm 0,03) \text{ V}$ | $(66 \pm 30) \text{ mV}$ |
| | $(50 \pm 3) \text{ mV}$ | $(100 \pm 3) \text{ mV}$ | $(154 \pm 6) \text{ mV}$ | $(202 \pm 3) \text{ mV}$ | $(252 \pm 3) \text{ mV}$ | |
| | $(-0,7 \pm 0,03) \text{ V}$ | $(-1,55 \pm 0,03) \text{ V}$ | $(-2,41 \pm 0,03) \text{ V}$ | $(-3,02 \pm 0,03) \text{ V}$ | $(-3,82 \pm 0,03) \text{ V}$ | |

Tabelle 2 $R_g = 274 \text{ k}\Omega$

| | | | | | | |
|-----------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| Eingangs: | $(253 \pm 3) \text{ mV}$ | $(202 \pm 3) \text{ mV}$ | $(152 \pm 3) \text{ mV}$ | $(102 \pm 3) \text{ mV}$ | $(50 \pm 3) \text{ mV}$ | $(0 \pm 1) \text{ mV}$ |
| Ausgangs: | $(-21,8 \pm 0,1) \text{ V}$ | $(-17,0 \pm 0,1) \text{ V}$ | $(-12,5 \pm 0,1) \text{ V}$ | $(-7,9 \pm 0,1) \text{ V}$ | $(-3,4 \pm 0,1) \text{ V}$ | $(1,2 \pm 0,1) \text{ V}$ |
| | $(50 \pm 6) \text{ mV}$ | $(101 \pm 3) \text{ mV}$ | $(152 \pm 6) \text{ mV}$ | $(204 \pm 3) \text{ mV}$ | | |
| | $(5,6 \pm 0,1) \text{ V}$ | $(10,9 \pm 0,1) \text{ V}$ | $(15,0 \pm 0,1) \text{ V}$ | $(19,9 \pm 0,1) \text{ V}$ | | |

Aufgabe 1: Sinus 1KHz (Spannen aus Grenzwerten werden als exakt angegeben)

| | | | | | | | |
|----------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Signa V_{SS} | 0,05 V | 0,15 V | 0,25 V | 0,4 V | 0,6 V | 0,8 V | 1 V |
| Amplitude | $(0,43 \pm 0,05) V$ | $(1,26 \pm 0,05) V$ | $(2,1 \pm 0,05) V$ | $(3,3 \pm 0,05) V$ | $(5,4 \pm 0,05) V$ | $(7,0 \pm 0,05) V$ | $(8,6 \pm 0,05) V$ |

Tablette 2: $R_g = 680 k\Omega$

| | | | | | | | |
|----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Signa V_{SS} | 0,1 V | 0,2 V | 0,3 V | 0,4 V | 0,6 V | 0,8 V | 1 V |
| Amplitude | $(0,84 \pm 0,05) V$ | $(1,68 \pm 0,05) V$ | $(2,50 \pm 0,05) V$ | $(3,32 \pm 0,05) V$ | $(4,96 \pm 0,05) V$ | $(6,40 \pm 0,05) V$ | $(8,24 \pm 0,05) V$ |

Aufgabe 2: $V_{pp} = 0,3 V$ $R_g = 680 k\Omega$

| | | | | | | | | | | |
|---------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------|----------|----------|-----------|
| f [kHz] | 0,1 | 0,3 | 1 | 3 | 6 | 10 | 30 | 60 | 100 | 300 |
| U [V] | $5,6 \pm 0,1 V$ | $5,6 \pm 0,1 V$ | $5,36 \pm 0,1 V$ | $4,5 \pm 0,1 V$ | $3,2 \pm 0,1 V$ | $2,2 \pm 0,1 V$ | $0,96 V$ | $0,64 V$ | $0,48 V$ | $0,097 V$ |

| | | | | | | | | | | |
|---------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| f [kHz] | 0,1 | 0,3 | 1 | 3 | 6 | 10 | 30 | 60 | 100 | 300 |
| U [V] | $2,2 \pm 0,1 V$ | $2,2 \pm 0,1 V$ | $2,2 \pm 0,1 V$ | $2,2 \pm 0,1 V$ | $1,96 \pm 0,1 V$ | $1,64 \pm 0,1 V$ | $0,84 \pm 0,1 V$ | $0,68 \pm 0,1 V$ | $0,36 \pm 0,1 V$ | $0,20 \pm 0,1 V$ |

| | | | | | | | | | | |
|---------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| f [kHz] | 0,1 | 0,3 | 1 | 3 | 6 | 10 | 30 | 60 | 100 | 300 |
| U [V] | $1,32 \pm 0,1 V$ | $1,32 \pm 0,1 V$ | $1,32 \pm 0,1 V$ | $1,2 \pm 0,1 V$ | $1,32 \pm 0,05 V$ | $1,32 \pm 0,05 V$ | $1,24 \pm 0,05 V$ | $1,00 \pm 0,05 V$ | $0,96 \pm 0,05 V$ | $0,34 \pm 0,05 V$ |

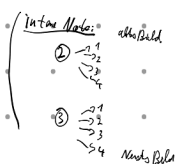
$U_{pp} = 1 V$ $R_g = 48,7 k\Omega$ $C = 560 pF$

| | | | | | | | | | | |
|---------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| f [kHz] | 0,1 | 0,3 | 1 | 3 | 6 | 10 | 30 | 60 | 100 | 300 |
| U [V] | $1,32 \pm 0,1 V$ | $1,32 \pm 0,1 V$ | $1,32 \pm 0,1 V$ | $1,24 \pm 0,1 V$ | $0,96 \pm 0,1 V$ | $0,76 \pm 0,1 V$ | $0,28 \pm 0,1 V$ | $0,14 \pm 0,1 V$ | $0,092 \pm 0,1 V$ | $0,04 \pm 0,07 V$ |

| | | | | | | | |
|---------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| f [kHz] | 0,3 | 0,6 | 1 | 3 | 6 | 10 | 20 |
| U [V] | $0,35 \pm 0,05 V$ | $0,62 \pm 0,05 V$ | $0,88 \pm 0,05 V$ | $1,16 \pm 0,05 V$ | $0,96 \pm 0,05 V$ | $0,74 \pm 0,05 V$ | $0,46 \pm 0,05 V$ |

Aufgabe 3:

Wir schauen uns die Sprünge am Oszilloskop und nehmen Bilder auf



Thema
18.12.2025

3. Auswertung

3.1 Bestimmung der Betriebsverstärkung

Für alle Folgenden Rechnungen gilt $R_E = 3,0 \pm 0,3 k\Omega$. Dabei wurde ein Widerstandsfehler von den üblichen 10% angenommen.

Um die Verstärkung mithilfe der Messungen zu bestimmen plotten wir die verstärkten Spannungen gegen die Eingangsspannung. Aus der Steigung, die wir mithilfe eines linearen Fits bestimmen, erhalten wir die Verstärkung.

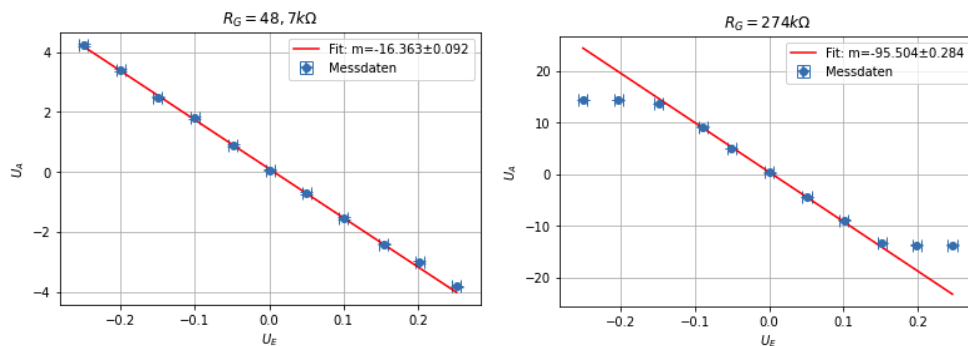


Abbildung 3.1: Gleichspannung

Wir erhalten also für die Verstärkung einen Wert von:

$$\underline{V'_{48,7} = 16.36 \pm 0.09 \quad V'_{274} = 95.50 \pm 0.28}$$

Für die angelegte Wechselspannung gehen wir ident vor:

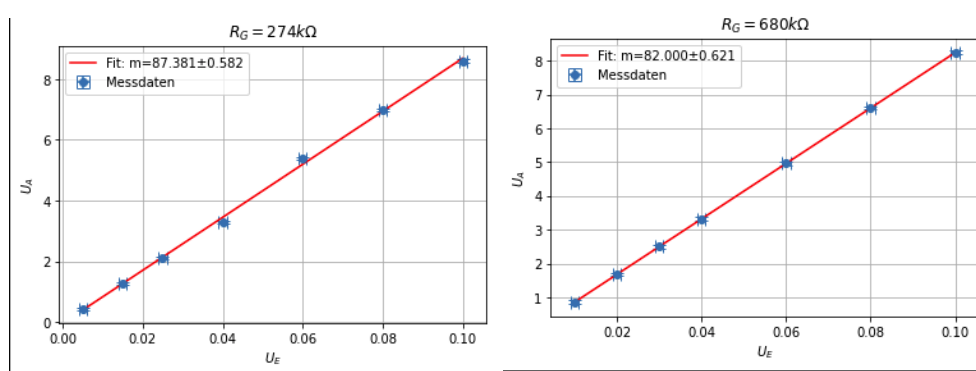


Abbildung 3.2: Wechselspannung

Hier erhalten wir Verstärkungen von:

$$\underline{V'_{274} = 87.4 \pm 0.5 \quad V'_{680} = 82.0 \pm 0.6}$$

Diese liegen jedoch auffällig nah aneinander.

Wir vergleichen also mit den Theoretisch zu erwartenden Werten, welche wir mithilfe der Formel

| Versuch | $V'_{measured}$ | V'_{theo} | σ |
|---------------------|------------------|----------------|----------|
| DC - 48,8k Ω | 16.36 ± 0.09 | $16,2 \pm 2,3$ | 0,06 |
| DC - 274k Ω | 95.50 ± 0.28 | 91 ± 13 | 0,3 |
| AC - 274k Ω | 87.4 ± 0.5 | 91 ± 13 | 0.3 |
| AC - 680k Ω | 82.0 ± 0.6 | 226 ± 32 | 4,4 |

Tabelle 3.1: Vergleich Theorie vs. Messwerte

1.3 und der Fehlerformel:

$$\Delta V'_{theo} = \sqrt{\left(\frac{-1}{R_e} \Delta R_g\right)^2 + \left(\frac{R_g}{R_e^2} \Delta R_e\right)^2} \quad (3.1)$$

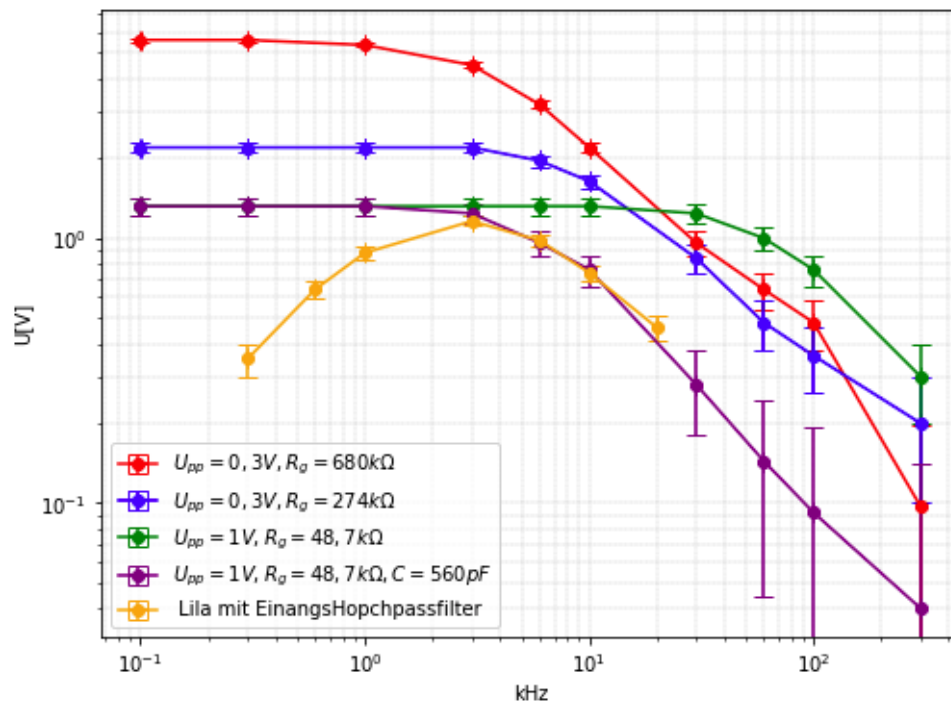
bestimmen können.

Es ergibt sich folgende Tabelle: Durch die Hohe Abweichung zum theoretischen Wert, bekräftigt sich die Vermutung, dass die Messwerte für den 680k Ω Widerstand nicht richtig sein können.

3.2 Frequenzgänge des Op-Amps

Im Verlauf unserer Messungen haben wir Frequenzgänge des Op-amps aufgenommen, um die Frequenzabhängigkeit der Leerlaufverstärkung näher zu betrachten.

Dabei sollten alle Verläufe in einem Diagramm dargestellt werden: Man erkennt schön die

**Abbildung 3.3:** Frequenzgänge verschiedener Konfigurationen

Abnahme der Leerlaufverstärkungsspannung bei höher werdenden Frequenzen. Außerdem erkennt man, dass ein zugeschalteter Kondensator die "Grenzfrequenz" verringert und die Verstärkerspannung bei der Lila Kurve früher abfällt. Zudem kann man das Verhalten eines Hochpassfilters beobachten, wenn man diesen in den Eingang schaltet, hier in der Gelben Kurve zu sehen.

3.3 Impulsverstärkung

Große Verstärkung:

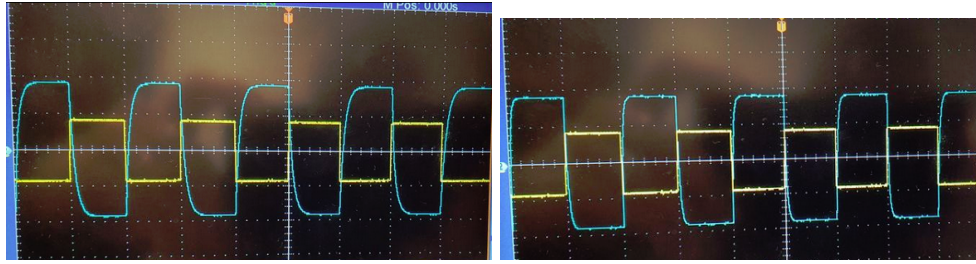


Abbildung 3.4: Oszilloskopbild $R = 680 \text{ k}\Omega$ (links) und $R = 274 \text{ k}\Omega$ (rechts)

Man kann erkennen, dass gelbe Eingangssignal sehr scharfe Flanken besitzt, aber das verstärkte Ausgangssignal in Blau jeweils "flachere" Flanken besitzt. Diese Phänomen nimmt mit der Verstärkung zu.

Betrachtet man eine kleine Verstärkung mit $R = 48,7 \text{ k}\Omega$, sind auch hier die Flanken deutlich schärfer.

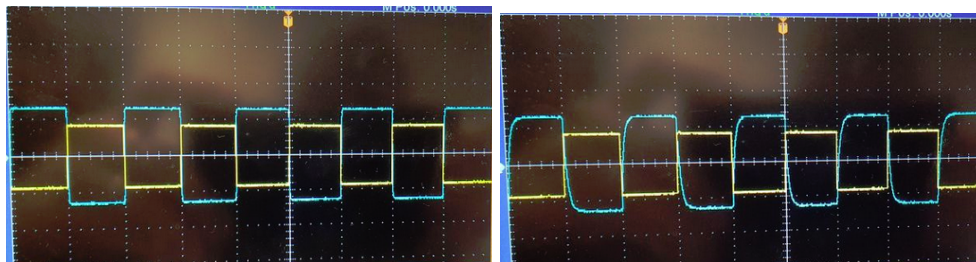


Abbildung 3.5: Niedrige Verstärkung $R = 48,7 \text{ k}\Omega$ ohne (links) und mit (rechts) Kondensator

Die schärferen Flanken durch die geringere Verstärkung werden durch einen parallel geschalteten Kondensator wieder abgeflacht, da nun der Kondensator Zeit braucht aufzuladen, deswegen entstehen hier auch wieder flacherer Flanken.

4. Zusammenfassung und Diskussion

Im Rahmen dieses Experiments wurde der Operationsverstärker $\mu\text{A} 741$ untersucht, wobei insbesondere seine Verstärkungseigenschaften, Frequenzgänge und das Verhalten bei Impulssignalen analysiert wurde. Die Messungen zur Bestimmung der Verstärkung ergaben Werte, die in den meisten Fällen mit den theoretischen Erwartungen übereinstimmten. Die Werte für die Widerstände $48,7\text{ k}\Omega$ und $274\text{ k}\Omega$ zeigten nur geringe Abweichungen, während der Messwert für den Widerstand von $680\text{ k}\Omega$ eine erhebliche Diskrepanz zum theoretischen Wert aufwies. Dies deutet stark darauf hin, dass hier eine fehlerhafte Messung vorlag, möglicherweise bedingt durchs falsche Ablesen am Oszilloskop, unzureichende Kalibrierung oder einen fehlerhaften Widerstand. Bei der Auswertung der Daten zeigte sich zudem, dass die Methode des Sigma-Vergleichs bei Tabelle 3.1 nicht immer sinnvoll ist, da beide Male ein Sigma-Wert von 0,3 angegeben wird, was jedoch nur auf den hohen relativen Widerstandsfehler zurückzuführen ist. In der Praxis würde dieser Widerstandsfehler aber zu unterschiedlichen tatsächlichen Abweichungen der Verstärkung führen, sodass der direkte Vergleich nicht ohne weiteres interpretierbar ist.

Die Frequenzgangmessungen bestätigten die theoretische Erwartung, dass die Verstärkung mit steigender Frequenz abnimmt und dass ein zusätzlicher Kondensator im Gegenkopplungsweig die Grenzfrequenz des Systems verringert. Ebenso war das Verhalten des Hochpassfilters deutlich sichtbar.

Bei der Untersuchung der Impulse zeigte sich, dass mit steigender Verstärkung die Flanken zunehmend abgeflacht wurden. Besonders deutlich wurde dieser Effekt bei hohen Verstärkungen, während bei kleinen Verstärkungen schärfere Flanken beobachtet wurden. Die parallel geschalteten Kondensatoren führten erwartungsgemäß zu einer weiteren Abflachung der Flanken, da die Lade- und Entladevorgänge Zeit benötigen.

Insgesamt war das Experiment erfolgreich, da die charakteristischen Eigenschaften des Operationsverstärkers gut nachvollzogen werden konnten. Die Messabweichungen lagen größtenteils im erwarteten Bereich, mit Ausnahme der Messung bei $680\text{ k}\Omega$, die vermutlich fehlerhaft war.

5. Anhang

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import curve_fit

def linear(x, m, b):
    return m * x + b

def plot_with_fit(x, y, x_err, y_err, fit_range=None):
    # Daten als Scatterplot mit Fehlerbalken
    plt.errorbar(x, y, xerr=x_err, yerr=y_err, fmt='o', label='Messdaten', capsize=5)

    # Bereich für den Fit auswählen
    if fit_range is not None:
        mask = (x >= fit_range[0]) & (x <= fit_range[1])
        x_fit = x[mask]
        y_fit = y[mask]
        x_err_fit = x_err[mask]
        y_err_fit = y_err[mask]
    else:
        x_fit, y_fit, x_err_fit, y_err_fit = x, y, x_err, y_err

    # Linearen Fit durchführen
    popt, pcov = curve_fit(linear, x_fit, y_fit, sigma=y_err_fit, absolute_sigma=True)
    m, b = popt
    m_err = np.sqrt(pcov[0, 0])

    # Fit-Kurve erzeugen
    x_line = np.linspace(min(x), max(x), 100)
    y_line = linear(x_line, *popt)
    plt.plot(x_line, y_line, label=f'Fit:  $m={m:.3f}$   $\pm$   $\{m\_err:.3f\}$ ', color='red')

    # Achsenbeschriftungen und Legende
    plt.xlabel('$U_E$')
    plt.ylabel('$U_A$')
    plt.legend()
    plt.title('$R_G = 48,7k\Omega$')
    plt.grid()
    plt.show()

    print(f'Steigung:  $\{m:.3f\}$   $\pm$   $\{m\_err:.3f\}$ ')
```

```
    return m, m_err

# Beispielhafte Daten
daten_x = np.array([-0.250, -0.200, -0.150, -0.100, -0.049, 0.001, 0.050, 0.100, 0.154, 0.200])
daten_y = np.array([4.23, 3.4, 2.49, 1.8, 0.88, 0.066, -0.7, -1.55, -2.41, -3.02, -3.82])
# Sprung in der Mitte
fehler_x = np.full_like(daten_x, 0.006)
fehler_y = np.full_like(daten_y, 0.03)

# Bereich für den Fit (z.B. nach dem Sprung)
fit_bereich = (-0.200, 0.200)

# Plotten und Fit durchführen
plot_with_fit(daten_x, daten_y, fehler_x, fehler_y, fit_bereich)
```

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

def plot_log_data(datasets, labels, colors):
    plt.figure(figsize=(8, 6))

    for i, (x, y, x_err, y_err) in enumerate(datasets):
        plt.errorbar(x, y, xerr=x_err, yerr=y_err, fmt='o', label=labels[i], linestyle='--', color=colors[i])

    plt.xscale('log')
    plt.yscale('log')
    plt.xlabel('kHz')
    plt.ylabel('U[V]')
    plt.legend()
    plt.grid(True, which='both', linestyle='--', linewidth=0.3)
    plt.show()
```

```
# Beispielhafte Datensätze
datasets = [
    (np.array([0.1, 0.3, 1, 3, 6, 10, 30, 60, 100, 300]), np.array([5.6, 5.6, 5.36, 4.5, 3.8, 3.2, 2.8, 2.4, 2.1, 1.8])),
    (np.array([0.1, 0.3, 1, 3, 6, 10, 30, 60, 100, 300]), np.array([2.2, 2.2, 2.2, 2.2, 1.8, 1.5, 1.2, 1.0, 0.8, 0.6])),
    (np.array([0.1, 0.3, 1, 3, 6, 10, 30, 60, 100, 300]), np.array([1.32, 1.32, 1.32, 1.32, 1.1, 0.9, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4])),
    (np.array([0.1, 0.3, 1, 3, 6, 10, 30, 60, 100, 300]), np.array([1.32, 1.32, 1.32, 1.32, 1.1, 0.9, 0.7, 0.6, 0.5, 0.4])),
    (np.array([0.3, 0.6, 1, 3, 6, 10, 20]), np.array([0.35, 0.64, 0.88, 1.16, 0.98, 0.74, 0.58, 0.45, 0.35, 0.28]))]
```

```
]
```

```
labels = [ '$U_{pp} = 0,3V$, R_g = 680k\Omega$', '$U_{pp} = 0,3V$, R_g = 274k\Omega$'  
colors = [ 'red', 'blue', 'green', 'purple', 'orange' ]
```

```
# Plotten
```

```
plot_log_data(datasets, labels, colors)
```

Quellen- und Literaturverzeichnis

- [1] CAPTAIN JONI: *pap1-tex-vorlage*. <https://github.com/captain-joni/pap1-tex-vorlage>. – [Online; Stand 28.08.2024]
- [2] DR. J. WAGNER: *Physikalisches Praktikum 1 für Studierende der Physik B.Sc.* <https://www.physi.uni-heidelberg.de/Einrichtungen/AP/info/Corona/PAP1.pdf>. – [Online; Stand 01/2014]