

Graz University of Technology

Institut für Materialphysik der Technischen Universität Graz

LABORÜBUNGEN: ELEKTRONIK UND COMPUTERUNTERSTÜTZTE MESSTECHNIK

Übungsnummer: 2

Übungstitel: Operationsverstärker

Gruppennummer: 7

Name: Maximilian PHILIPP

Name: Michael HINTERLEITNER

Mat. Nr.: 11839611

Mat. Nr.: 12002411

Datum der Übung: 04.05.2022

Sommersemester 2022

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	3
2	Vorbereitung	5
3	Grundlagen	12
4	Versuchsdurchführung	13
4.1	Elektrometerverstärker	14
4.1.1	Simulation	14
4.1.2	Steckbrett	15
4.2	Integrator	19
4.2.1	Simulation	19
4.2.2	Steckbrett	23
4.2.3	Simulation des Integrators mit zusätzlicher Verstärkerstufe	27
5	Auswertung	31
5.1	Elektrometerschaltung	31
5.1.1	Simulation	31
5.1.2	Steckbrett	31
5.2	Umkehrintegrator	33
5.2.1	Simulation	33
5.2.2	Steckbrett	33
5.3	Integrator mit Verstärkerstufe	33
5.3.1	Simulation	33
6	Diskussion und Zusammenfassung	33
6.1	Diskussion	33
6.1.1	Elektrometerverstärker	33
6.1.2	Integrator	34
6.2	Zusammenfassung	36

Elektronik und computerunterstützte Messtechnik
Labor, SS 2022
PHY.I02UF

Übung 2 - Operationsverstärker

A: Elektrometerverstärker und B: Integrator

**Abgabe der Vorbereitung: bis Freitag, 29. April 2022, 12:00 Uhr im Briefkasten 517,
EG, Petersgasse 16 (Inst. f. Materialphysik)**

Praktikumstermin: KW18 (04.05 bis 06.05.2022) – USB mitnehmen!

A) Nichtinvertierender Verstärker (Elektrometerverstärker)

1) Angaben

Operationsverstärker: $\mu\text{A } 741 \text{ CN}$

Betriebsspannung: $\pm 15 \text{ V}$

Eingangsspannung: $U_e = 125 \text{ mV}$

Ausgangsspannung: $U_a = 8 \text{ V}$

2) Vorbereitung

- 1) Dimensionieren Sie das Netzwerk: Die Widerstände im Netzwerk sind so zu dimensionieren, dass die über den Gegenkopplungswiderstand fließenden Ströme um etwa einen Faktor 200 größer sind als der Eingangsruhestrom.
- 2) Es sind die Parameter Eingangswiderstand r_e , Ausgangswiderstand r_a , Schleifenverstärkung und Bandbreite der Schaltung zu berechnen. (Datenblatt zu $\mu\text{A } 741 \text{ CN}$ in VO Unterlagen)
- 3) Um eine Messung des Aussteuerungsbereiches am Steckbrett durchzuführen, muss ein Eingangsspannungsteiler dimensioniert werden, sodass ein Bereich von $\pm 0,5 \text{ V}$ eingestellt werden kann. Dimensionieren Sie diesen auf Basis der Betriebsspannung mit **zwei Widerständen**, sowie **Potentiometer** und skizzieren Sie ihn. Dürfen beliebig große Widerstände verwendet werden? Begründen Sie die Antwort.
- 4) Zeichnen Sie einen Schaltplan, inklusive Pin-Bezeichnung (Keine freien Pins am OPV!) und tragen Sie die berechneten Widerstandswerte des Netzwerks ein.

3) Praktische Durchführung

- 5) Die Schaltung ist mit LTspice zu zeichnen und auszudrucken (PDF).
- 6) Der Aussteuerungsbereich ist mit einem „DC SWEEP“ zu bestimmen und plotten.
- 7) Anstatt des $\mu\text{A } 741 \text{ CN}$, wird in der Simulation das Bauteil LM741 verwendet.
- 8) Der Operationsverstärker ist auf seine Funktionstüchtigkeit mit Hilfe der vorgegebenen Testschaltung (Invertierender Verstärker) zu überprüfen.
- 9) Der Verstärker (bestehend aus OPV, Netzwerk und Spannungsteiler für die Eingangsspannung) ist auf dem Steckboard aufzubauen.
- 10) Es ist der Offsetspannungsabgleich durchzuführen.
- 11) Die gemessene Ausgangsspannung ist mit der zu erwartenden Ausgangsspannung zu vergleichen und das Ergebnis zu protokollieren.
- 12) Es ist der Aussteuerungsbereich des Verstärkers zu messen.
- 13) Die Ergebnisse der Simulation und Messung am Steckboard sind zu diskutieren.

B) Integrator

1) Angaben

Operationsverstärker: $\mu\text{A741 CN}$

Betriebsspannung: $\pm 15 \text{ V}$

Bauen Sie einen Umkehrintegrator, sodass 15 Sekunden nach Anlegen einer **positiven** Eingangsspannung U_e von 100 mV die Ausgangsspannung U_a den Wert **-10 V** erreicht. Verwenden Sie dazu einen Kondensator mit einer Kapazität von $6,8 \mu\text{F}$. Erweitern Sie in der Simulation die Schaltung um eine geeignete OPV Verstärkerstufe, so dass bereits nach 10 s eine **positive** Ausgangsspannung von 10 V erreicht wird (dies muss am Steckbrett nicht umgesetzt werden).

2) Vorbereitung

- 1) Dimensionierung des Netzwerkes: Bestimmen Sie den für die o.g. Integrationszeit passenden Widerstand R .
- 2) Dimensionieren Sie (auf Basis der Betriebsspannung) für die genannte Eingangsspannung U_e einen genügend belastbaren Spannungsteiler (für den Eingangsstrom des Integrators).
- 3) Zeichnen Sie den Schaltplan, und tragen Sie darin die berechneten Werte und beschalteten Pins in die Schaltskizze ein.
- 4) Erweitern Sie die Schaltung um eine passende OPV Verstärkerstufe (siehe Angabe) - Dimensionieren Sie den hierfür erforderlichen Teil des Netzwerkes.
- 5) Zeichnen Sie den Schaltplan und tragen Sie darin die berechneten Werte sowie beschalteten Pins in die Schaltskizze ein.
- 6) Skizzieren Sie die Ausgangsspannung bei einer Sinus-, Rechteck- und Kippschwingung als Eingangssignal und begründen Sie das Ergebnis.
- 7) Leiten Sie die Impedanz ($X_c = \left| \frac{-j}{\omega c} \right| \right)$ eines Kondensators für eine Wechselspannung her und folgern Sie daraus die frequenzabhängige Verstärkung ($\frac{U_a}{U_e}$) der Schaltung. Skizzieren/Plotten Sie den Verlauf (**Bode-Diagramm**).

3) Praktische Durchführung:

- 1) Der Umkehrintegrator ist mit LTspice zu zeichnen und als Abbildung zu speichern.
- 2) Die Integrationsdauer der Schaltung ist mit einer konstanten Spannungsquelle zu simulieren. Die Ergebnisse sind mit der Vorbereitung zu vergleichen.
- 3) Der OPV ist auf die Funktionstüchtigkeit zu prüfen. (siehe Aufgabe A, Punkt 8)
- 4) Der Umkehrintegrator (bestehend aus OPV, Netzwerk und Spannungsteiler) ist auf dem Steckboard aufzubauen.
- 5) Es ist der Offsetspannungsabgleich durchzuführen.
- 6) Die aufgebaute Schaltung ist in Betrieb zu nehmen und die Integrationszeit zu protokollieren (Stoppuhr). Die Messung ist fünfmal zu wiederholen.
- 7) Die Schaltung (und Simulation) ist mit verschiedenen Spannungsquellen (Sinus, Rechteck, Dreieck) zu testen. Protokollieren und vergleichen Sie die Ergebnisse. Nutzen Sie dazu Oszilloskop und Frequenzgenerator.
- 8) Vergleichen Sie die frequenzabhängige Verstärkung der Schaltung in einem Bereich zwischen 5 und 50 Hz mit der Simulation.
- 9) Die Simulation ist um die genannte Verstärkerstufe zu erweitern. Wiederholen Sie mit der neuen Schaltung Punkt 2 und 7
- 10) Die Ergebnisse aus Messung und Simulation sind zu diskutieren.

A) Nichtinvertierender Verstärker

$$1) 200 \cdot I_B = I_G$$

$$200 \cdot 80\text{nA} = 16\text{mA}$$

$$R_n = \frac{U_a - U_e}{I_a} = 492\text{k}\Omega$$

$$A = \frac{U_a}{U_e} = 64$$

$$A = 1 + \frac{R_n}{R_1}$$

$$63 = \frac{R_n}{R_1}$$

$$63 R_1 = R_n$$

$$k_1 = \frac{R_n}{63} = 7,8\text{k}\Omega$$

3)

$$I_S > I_G$$

$$R_{ges} = \frac{U_{ges}}{I_S} = \frac{30V}{7\text{mA}} = 30\text{k}\Omega$$

$$R_{pot} = \frac{U_{pot}}{I_S} = \frac{1V}{1\text{mA}} = 1\text{k}\Omega$$

$$R_{ges} = 2R_s + R_{pot}$$

$$R_s = \frac{29\text{k}\Omega}{2} = 14,5\text{k}\Omega$$

$P = I^2 R$ R darf nicht zu klein werden dann wird die Verlustleistung zu hoch & der Widerstand brennt durch $P < 0,25W$

R_{ges} darf auch nicht zu groß werden, da dann der Spannungssteilerstrom (zuklein wird) größenordnungsmäßig dem Rückkopplungswiderstand

$$2) \text{Schleifenverstärkung} \\ |g| = \frac{|A_0|}{|A|} = \frac{10^5}{64} = 1560$$

Bandbreite

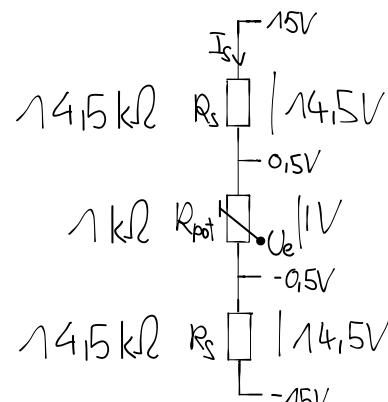
$$f_g = \frac{f_T}{|A|} = \frac{10^6\text{Hz}}{64} = 15,6\text{kHz}$$

Ausgangswiderstand

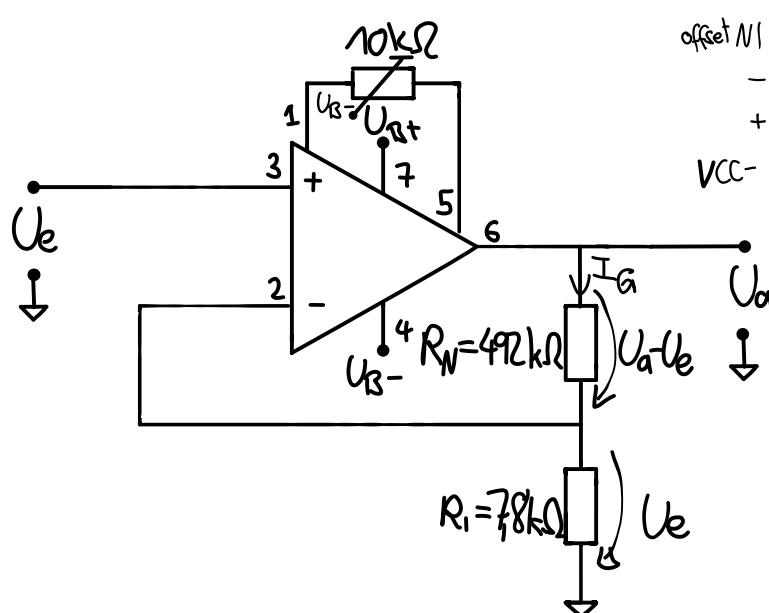
$$r_a = \frac{U_a}{I_a} \approx \frac{V_a, \text{datasheet}}{|g|} = 0,64\Omega$$

Eigenswiderstand

$$r_e = \frac{U_e}{I_e} \approx V_{e,D} \cdot |g| = 1\text{m}\Omega \cdot 1560 = 1,56\text{G}\Omega$$



4)



offset N1	1	8	N/C
-	2	7	VCC+
+	3	6	OUT
VCC-	4	5	OFFSET N2

10kΩ offset Datasheet

8.1 Application note
The input offset voltage of operational amplifiers (opamps) arises from unavoidable mismatch in the differential input stage of the opamp circuit caused by mismatched transistor pairs, collector currents, current-gain beta, collector or emitter resistors and so forth. The input offset pins allow the designer to adjust for mismatched transistors in the circuit. This can be done by connecting a potentiometer between pins 1 and 2 or a potentiometer between the inputs as shown in Figure 12. A potentiometer can fine-tune the circuit during testing or for applications which require precise control of offset.

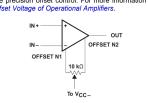


Figure 12. Input Offset Voltage Null Circuit

B) Integrator

$$1) I_R + I_C = I_B \approx 0$$

$$0 = \frac{U_e}{R} + C \frac{dU_a}{dt}$$

$$U_a(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_e dt$$

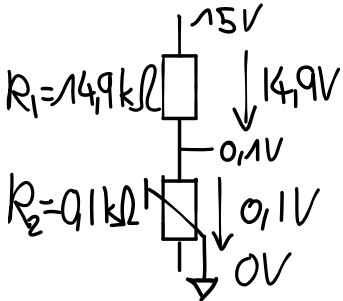
$$U_a(t) = -\frac{U_e t}{RC}$$

$$R = \frac{U_e \cdot t}{U_a(t) C} = -\frac{0,1V \cdot 15s}{-10V \cdot 6,8nF} = 22k\Omega$$

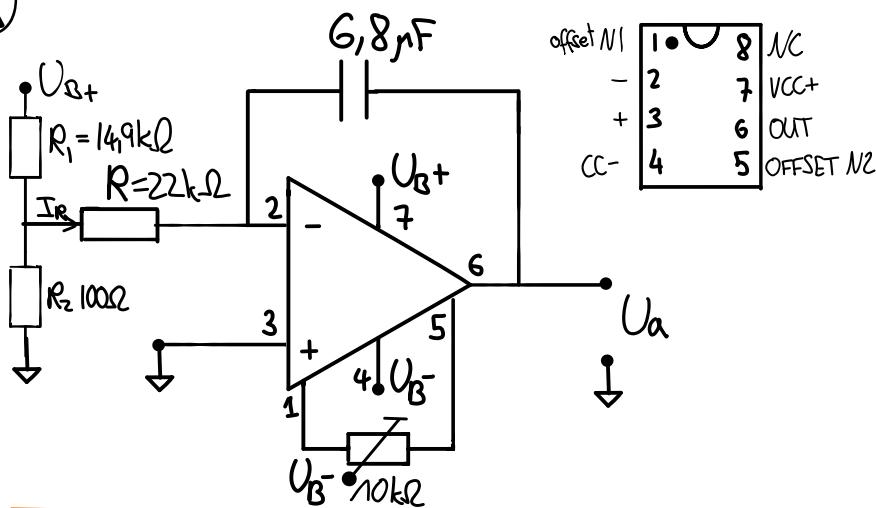
$$2) I_S \gg I_R \approx 4mA$$

$$1mA \approx \frac{15V}{R_{Ges}}$$

$$R_{Ges} = R_1 + R_2 = 15k\Omega \quad R_2 = 0,1k\Omega$$



3)



$$4) U_a(10s) = -\frac{U_e t}{RC} = -6,68V$$

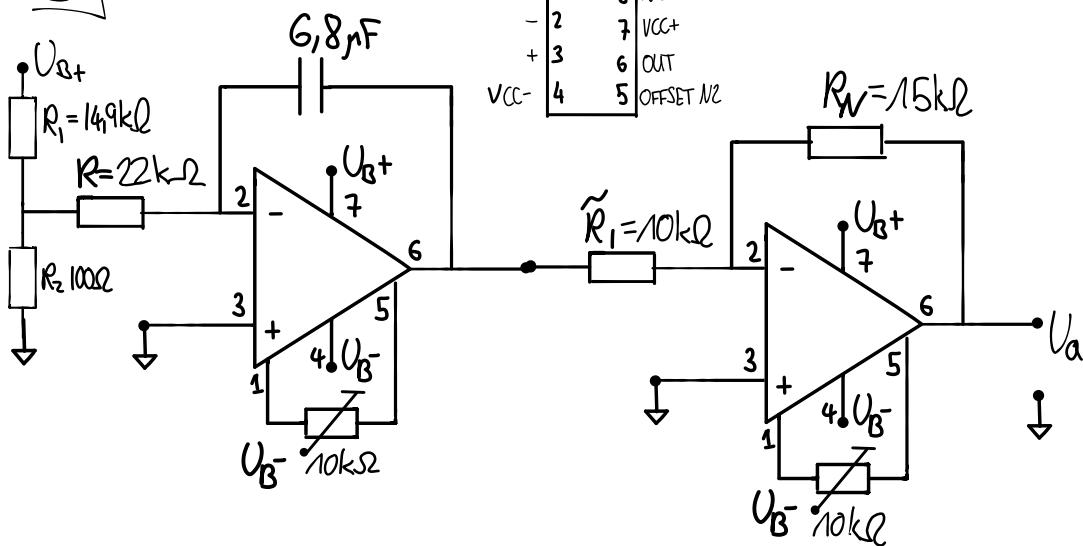
$$A = -\frac{R_N}{R_1} = \frac{U_a}{U_e} = -\frac{10V}{-6,68V} = -1,496 \approx -\frac{3}{2}$$

$$\tilde{R}_1 = 10k\Omega$$

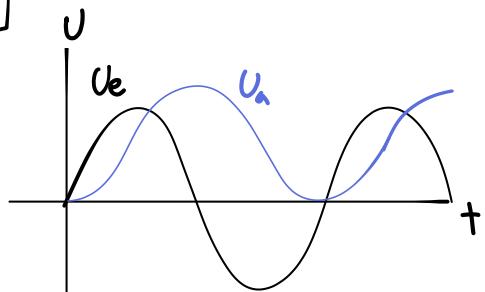
$$R_N = 15k\Omega$$

$$\left| \frac{U_a}{R_N} \right| \wedge \left| \frac{U_e}{R_1} \right| \gg I_B \checkmark$$

5)

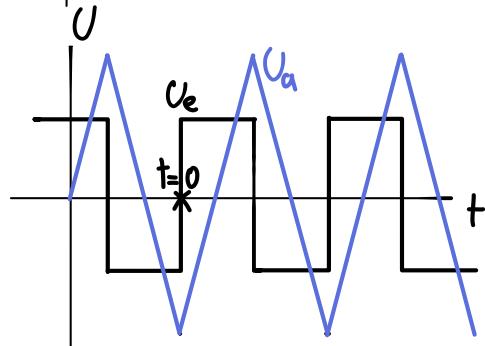


6)



Begründung

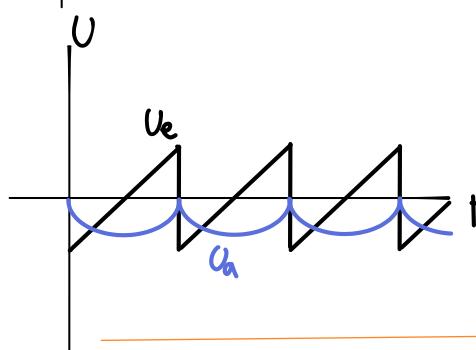
$$\int_0^t \sin(\omega t) dt = \frac{1}{\omega} \cos(\omega t)$$



$$\int_0^t C(t) dt = ct$$

$$C = \begin{cases} k & \frac{T}{2} \geq t \bmod(T) \\ -k & \frac{T}{2} < t \bmod(T) \end{cases}$$

$$k \in \mathbb{Z} \quad T+t=t$$



$$\int_0^t ct dt = \frac{c t^2}{2}$$

$$7) X_C(\omega) = \frac{U(\omega)}{i(\omega)} = \frac{U_0 e^{j\omega t}}{i_0 e^{j\omega t}}$$

$$i(t) = C \frac{du}{dt} = j\omega C U_0 e^{j\omega t}$$

$$\Rightarrow X_C(\omega) = \frac{1}{j\omega C} = \frac{-j}{\omega C}$$

$$U_e = U_R$$

$$I_R = -I_C = \frac{U_R}{R}$$

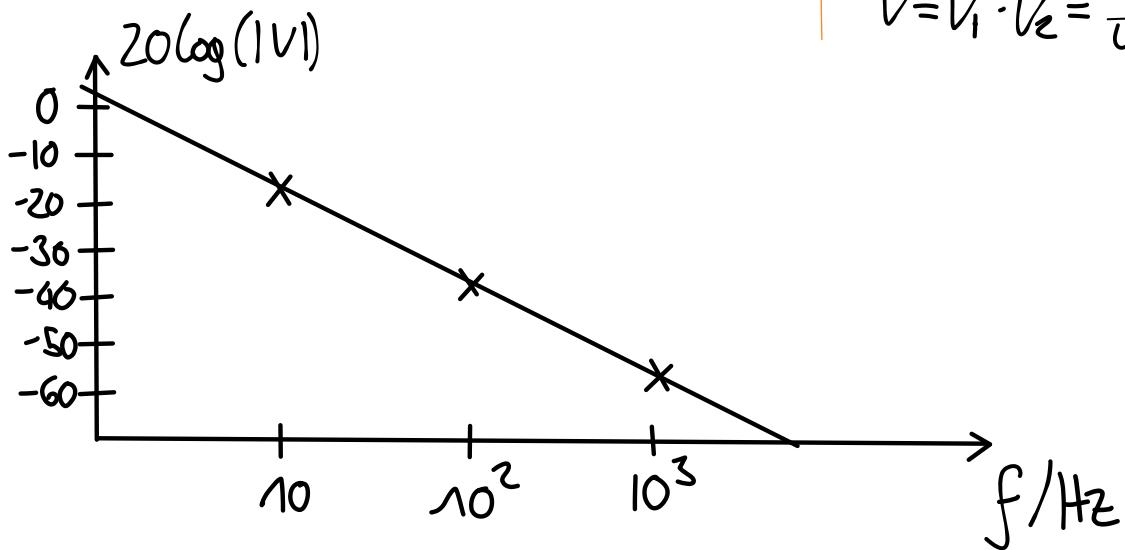
$$U_C = X_C \cdot I_C = -\frac{U_R}{\omega R C}$$

$$V_a = \frac{U_a}{U_e} = -\frac{1}{\omega R C}$$

OplV

$$V_L = -\frac{R_n}{R_i}$$

$$V = V_1 \cdot V_L = \frac{R_n}{\omega R C R_i}$$



26.4.22 ECM: Übung 2 Operationsverstärker \Rightarrow Vorbereitung

A) Nichtinvertierender Verstärker (Elektrometerverstärker)

Angaben: Operationsverstärker: μA 741 CN

Betriebsspannung: $\pm 15 \text{ V}$

Eingangsspannung: $U_e = 125 \text{ mV}$

Ausgangsspannung: $U_a = 8 \text{ V}$

H E12 R |

verwenden.

1.) Dimensionierung

Eingangsruhestrom (aus Datenblatt): $I_s = 80 \text{ nA}$

Strom durch Gegenkopplungswiderstand: $I_a = 200 \cdot I_s = 16 \mu\text{A}$

mit Näherung $I_n \approx 0$ (siehe VO)

$$\hookrightarrow U_a = I_a \cdot (R_1 + R_2) \Rightarrow \frac{U_a}{I_a} = R_1 + R_2$$

$$U_{R_2} \approx U_e \quad (\text{siehe VO}) \Rightarrow U_e = I_a \cdot R_2$$

$$\Rightarrow R_2 = \underline{\underline{7812,5 \Omega}} \rightarrow \text{E12: } 8,2 \text{ k}\Omega \quad \text{bca. } (6,8+1)\text{k}\Omega$$

$$\Rightarrow R_1 = \frac{U_a}{I_a} - R_2 = \underline{\underline{492,19 \text{ k}\Omega}}$$

$$(R_L = \frac{U_a}{I_a}) \quad \hookrightarrow \text{E12: } (470+22)\text{k}\Omega$$

$$2.) r_e = \frac{A_D}{A} \cdot r_o = \left| \begin{array}{l} A_D, A \text{ siehe unten} \\ r_o = 1 \text{ M}\Omega \end{array} \right| = \underline{\underline{1,56 \text{ G}\Omega}} \quad (\text{Formel per wiki})$$

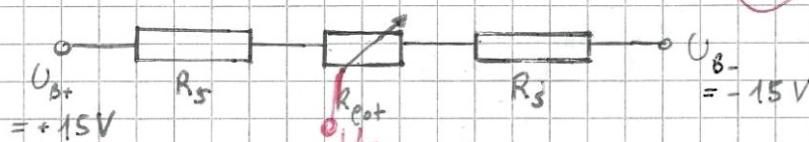
$$r_a = r_{ao} \cdot \frac{A}{A_D} \quad \text{mit } A = \frac{U_a}{U_e} = 64 \quad \text{Verst.} \\ \text{und } A_D = 10^5 \quad \text{Diff. verst.} \\ r_{ao} = 1 \text{ k}\Omega$$

$$\Rightarrow r_a = \underline{\underline{0,64 \Omega}}$$

$$g = \frac{A_D}{A} = \underline{\underline{1562,5}}$$

$$f_T = \frac{k_T}{A} = \left| f_T = 1 \text{ MHz} \right| = \underline{\underline{15,625 \text{ kHz}}}$$

3.)



$$R_{ges} = 2R_S + R_{pot} = \frac{U_{ges}}{I_s} = \frac{20 \text{ V}}{10^{-9} \text{ A}} = \underline{\underline{30 \text{ k}\Omega}}$$

zur Stabilität $I_s \gg I_a$

$$R_{pot} = \frac{U_{pot}}{I_s} = \frac{(0,5+0,5)\text{V}}{10^{-9} \text{ A}} = \underline{\underline{1 \text{ k}\Omega}}$$

$$R_S = (R_{ges} - R_{pot}) \cdot \frac{1}{2} = \underline{\underline{14,5 \text{ k}\Omega}} \rightarrow 15 \text{ k}\Omega^2 \quad \text{oder } \{12+3,2\} \text{ k}\Omega$$

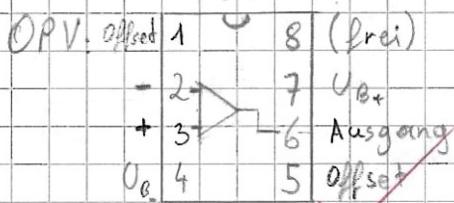
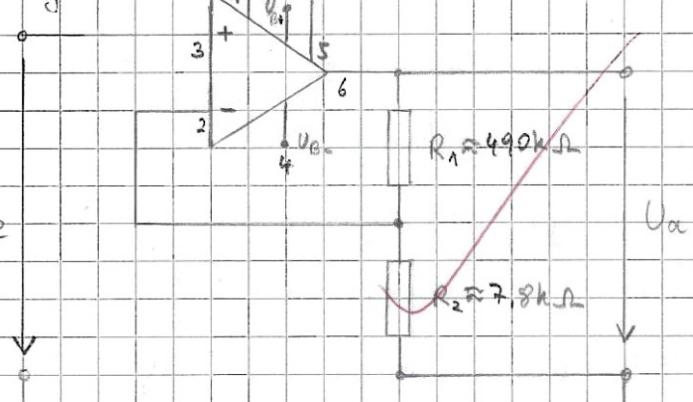
Es können nicht beliebig große Widerstände verwendet werden, da der Strom zu gering werden würde (Ohm'sches Gesetz), wodurch $I_s \gg I_a$ nicht mehr unbedingt gelten würde.

4.)

Schaltung:

~~X~~
wie ist
Teile von U_e
verändert?

$-U_B$
Eingangsspannung
Offset = Abgetrennt



B) Integrator

Angaben: OPV: μA 741 CN

$C = 6.8 \mu F$

$U_B = \pm 15 V, U_e = 100 mV, U_{o1}(t=0) = -1.0 V, t_1 = 15 s, U_{o2}(t=0) = 1.0 V, t_2 = 1.0 s$

1.) Dimensionierung Widerstand:

$I_e + I_c = 0$

$\Rightarrow \frac{U_e}{R} + C \frac{dU_a}{dt} = 0 \Rightarrow \int_{U_a(0)}^{U_a(t)} dU_a = - \frac{U_e}{RC} dt$

$U_a(t) - U_a(t=0) = - \frac{U_e}{RC} \cdot t \Rightarrow \text{mit } t_1 = 15 s \text{ & } U_a(t_1) = -1.0 V$

$\Rightarrow R = - \frac{U_e \cdot t_1}{U_a(t_1) \cdot C} = 22.06 k\Omega \rightarrow 22 k\Omega$

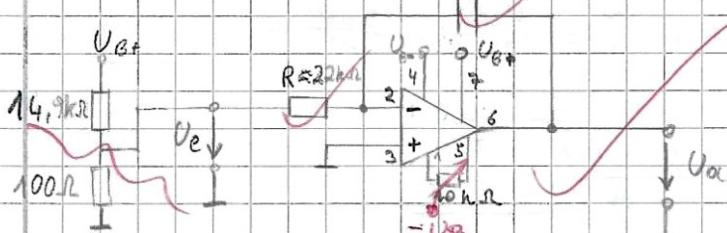
2.) Dimensionierung Spannungssteiler

$15 V - 0.1 V = 14.9 V = I_s R_{B1}$

$\Rightarrow R_{B1} = \frac{14.9 V}{10^{-3} A} = 14.9 k\Omega$

$U_{B2} = 0.1 V = I_s R_{B2} \Rightarrow R_{B2} = 0.1 k\Omega$

3.)



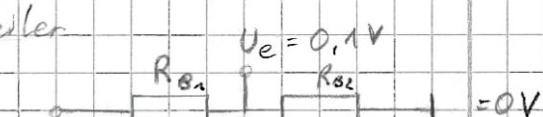
Offset 1 8 (frei)

invertierender Eingang 2 7 U_{B+}

nicht invertierender Eingang 3 Ausgang

 U_B 4 5 Offset

Seite: 2/4



I_e gegenüber I_s
vernachlässigbar

siehe Korr von
Gruppenkollege

40

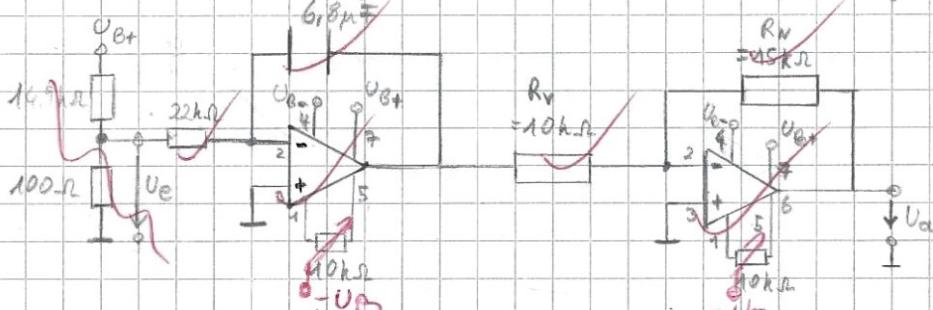
$$U_{a_m}(10s) = -\frac{U_0 \cdot t}{RC} = -6,67 \text{ V}$$

erfordert nachgelagerte Invertierung

$$\text{Verstärkung } A = \frac{U_{o2,2}}{U_{o1,1}} = \frac{12V}{-6,67V} = -1,5 = -\frac{R_N}{R_V}$$

$$R_V = 10k\Omega \quad (\text{schon in Schaltung verwendet})$$

5.) Gesamtschaltung: Im Anschluss an Integrator noch eine invertierende Verstärkerschaltung, die (annähernd) instantan erfolgt, damit die Integrationszeit von 10 s eingehalten wird.



Pinreihenfolge analog wie in A4) & B3)

6) Sinus - Eingangssignal:

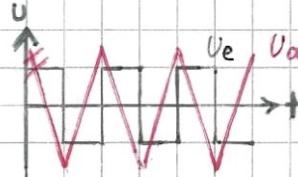
Achtung, zu Beginn
ist ~~E-Mail~~ laden

$$\Rightarrow V_{A(t=0)} = 0V$$



Das Integral des "sin" liefert
 $-\cos$ und durch zusätzliche Inver-
tierung \cos Verstärkungsfaktoren
können dazugebracht werden,
wobei diese sich auch beim
 $\int \sin(wt) dt = -\cos(wt) \cdot \frac{1}{w}$ mit $\frac{1}{w}$
kürzen können).

Rechteck - Eingangssignal:



Konstanten integrieren sich zu linearen
Verhältnissen/Steigungen auf.

Kipp-Eingangssignal:



Lineare Steigungen integrieren sich zu Parabeln ($\int x \, dt = x \cdot \frac{t^2}{2} + C$).

$$7) \quad X_c = \frac{u}{i} \quad , \quad i(t) = C \cdot \frac{du(t)}{dt} = \left| u(t) = U_0 e^{j\omega t} \right| = C i \omega U_0 e^{j\omega t}$$

$$X_c = \frac{V_o e^{i\omega t}}{C_i w e^{i\omega t} V_o} = \frac{1}{i w C} = \frac{-i}{w C}$$

$$U_e = U_R \quad I_R = -I_c = \frac{U_e}{R}$$

$$V_c = -X_c \cdot I_c = -\frac{U_o}{\omega RC}$$

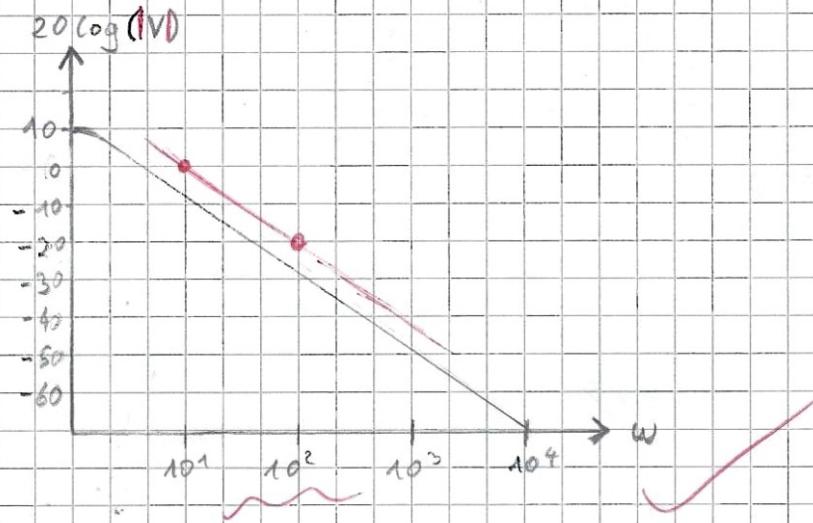
© Herlitz

$$V_h = \frac{U_a}{U_e} = -\frac{1}{WRC}$$

$$V_2 = \frac{U_{02}}{U_{01}}$$

$$V = \frac{R_N}{R_V} \cdot \frac{1}{\omega R_C}$$

Bode - Diagramm:



3 Grundlagen

Operationsverstärker (kurz 'OPV' oder 'OpAmp') dienen grundlegend der Verstärkung von Gleichspannungen. Sie besitzen einen nicht-invertierenden, der meist mit einem Plus, und einen invertierenden Eingang, der mit einem Minus dargestellt wird. Zu beachten ist, dass die Verstärkung auf die Differenzspannung der beiden Eingänge wirkt. Je zwei zusätzliche Anschlüsse finden sich für die positive und negative Betriebsspannung und für den Offsetabgleich, damit bei keiner Eingangsspannung auch keine Ausgangsspannung auftritt - dieser wird also in einer externen Schaltung durchgeführt.

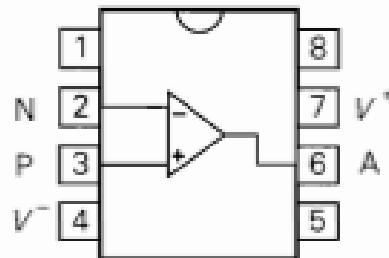


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Pinbelegung eines klassischen Operationsverstärkers. Hierbei bezeichnet 2 den invertierenden, 3 den nicht-invertierenden Eingangskanal, 6 den Ausgang, 4 den Anschluss für die negative sowie 7 den Anschluss für die positive Betriebsspannung, 1 und 5 die Pins für den Offsetabgleich und 8 einen freien Pin. [4]

In Abbildung 1 sind die Pins eines Operationsverstärkers, wie er auch in der Laborübung verwendet wurde, zu sehen. Dabei ist zu beachten, dass jeder nicht belegte Pin auf Masse gelegt werden soll.

Es gibt vier grundlegende Arten der Verwendung von Operationsverstärkern, darunter der nicht-invertierende Betrieb, bei dem das Eingangssignal nur auf den nicht-invertierenden Kanal gelegt wird und der invertierende auf Masse gelegt wird. Analog funktioniert der invertierende Modus, bei dem das Signal anstelle nun an den invertierenden Eingang gelegt wird, wodurch die Ausgangsspannung zusätzlich zur Verstärkung noch zum Eingangssignal invertiert wird. Beim Differenzbetrieb werden an beide Eingänge Signale angelegt und die Differenzspannung verstärkt. Im Falle des Gleichtaktbetriebs liegt das gleiche Eingangssignal an den beiden Eingängen

an, wodurch es theoretisch keine Differenzspannung und Verstärkung geben sollte - in der Realität resultiert allerdings eine Verstärkung, die als Gleichtaktverstärkung bezeichnet wird.

Da der Operationsverstärker ohne zusätzliche Verkopplung sehr stark frequenzabhängig ist und nur eine geringe Bandbreite gewünscht verstärkt, wird eine Gegenkopplung vom Ausgang zum Eingang durchgeführt, wodurch die Verstärkung zwar abnimmt, die Bandbreite jedoch stark vergrößert wird. Die Bandbreite wird wie gewohnt durch die Grenzfrequenz charakterisiert, bei welcher die Verstärkung noch 70 % der maximalen beträgt. Wenn nun beispielsweise ein Kondensator in der Rückkopplung verbaut wird, handelt es sich um eine Integratorschaltung, die im zweiten Teil der Laborübung untersucht wird.

Die resultierende Verstärkung lässt sich gemäß Gleichung 1 als Verhältnis der Ausgangs- U_a zur Eingangsspannung U_e berechnen.

$$V = \frac{U_a}{U_e} \quad (1)$$

4 Versuchsdurchführung

Für den praktischen Teil an der Steckplatine wurden Widerstände der E12-Reihe, mit denen die in der Vorbereitung angegebenen respektive errechneten Werte angenähert wurden, verwendet.

Die verwendeten Geräte sind Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Tabelle der verwendeten Geräte

Geräteliste	
Gerät/Bauelement	Typ
Oszilloskop	<i>Tektronix TDS 2002</i> [1]
Funktionsgenerator	<i>H-TRONIC FG250D</i> [2]
Netzgerät	nicht bestimmbar
Multimeter	<i>Fluke 175 TrueRMS</i> [5]
OPV	$\mu A 741$

4.1 Elektrometerverstärker

4.1.1 Simulation

Zur Simulation des Elektrometerverstärkers wird das Programm *LTSPICE* verwendet. Der Aufbau erfolgt analog zum skizzierten Schaltplan in Abbildung 2. Hier wurde das gleiche Bauteil wie im Kapitel Aufgabenstellung verwendet, nämlich der μ A741.

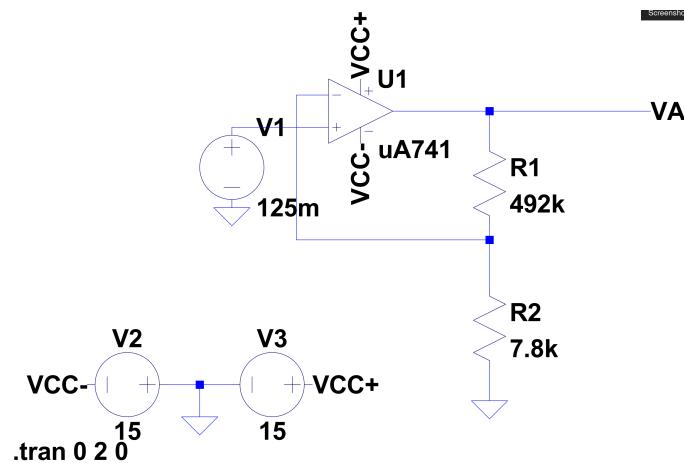


Abbildung 2: Dies ist die Elektrometerverstärkerschaltung; aufgebaut in *LTSPICE*.

Untersuchung des Aussteuerungsbereichs Um den Aussteuerungsbereich zu bestimmen, wurde ein DC-Sweep der Eingangsspannung durchgeführt und die Ausgangsspannung in Abhängigkeit der Eingangsspannung graphisch, wie in Abbildung 3 ersichtlich, dargestellt. Es musste in der Simulation kein Offsetspannungsabgleich durchgeführt werden.



Abbildung 3: Die Schaltung aus Abbildung 2 wurde auf den Aussteuerungsbereich untersucht, indem ein DC-Sweep durchgeführt wurde. Hier ist die Ausgangsspannung V_A über die Eingangsspannung V_1 aufgetragen. Die SPICE-Directive der Simulation ist `.dc V1 -0.3 0.3 0.01`

4.1.2 Steckbrett

Bevor die Schaltung aufgebaut werden kann, muss zunächst die Funktionstüchtigkeit des OPVs getestet werden, damit keine unzuverlässigen Komponenten verwendet werden. Daraufhin wird eine Impedanzwandlerschaltung mit dem überprüften, funktions tüchtigen OPV gebaut, mit welcher der Offsetspannungsabgleich leicht durchgeführt werden kann.

Testschaltung Zur Untersuchung der Funktionstüchtigkeit des OPVs wurde die im Labor vorhandene Testschaltung, siehe Abbildung 4, verwendet.

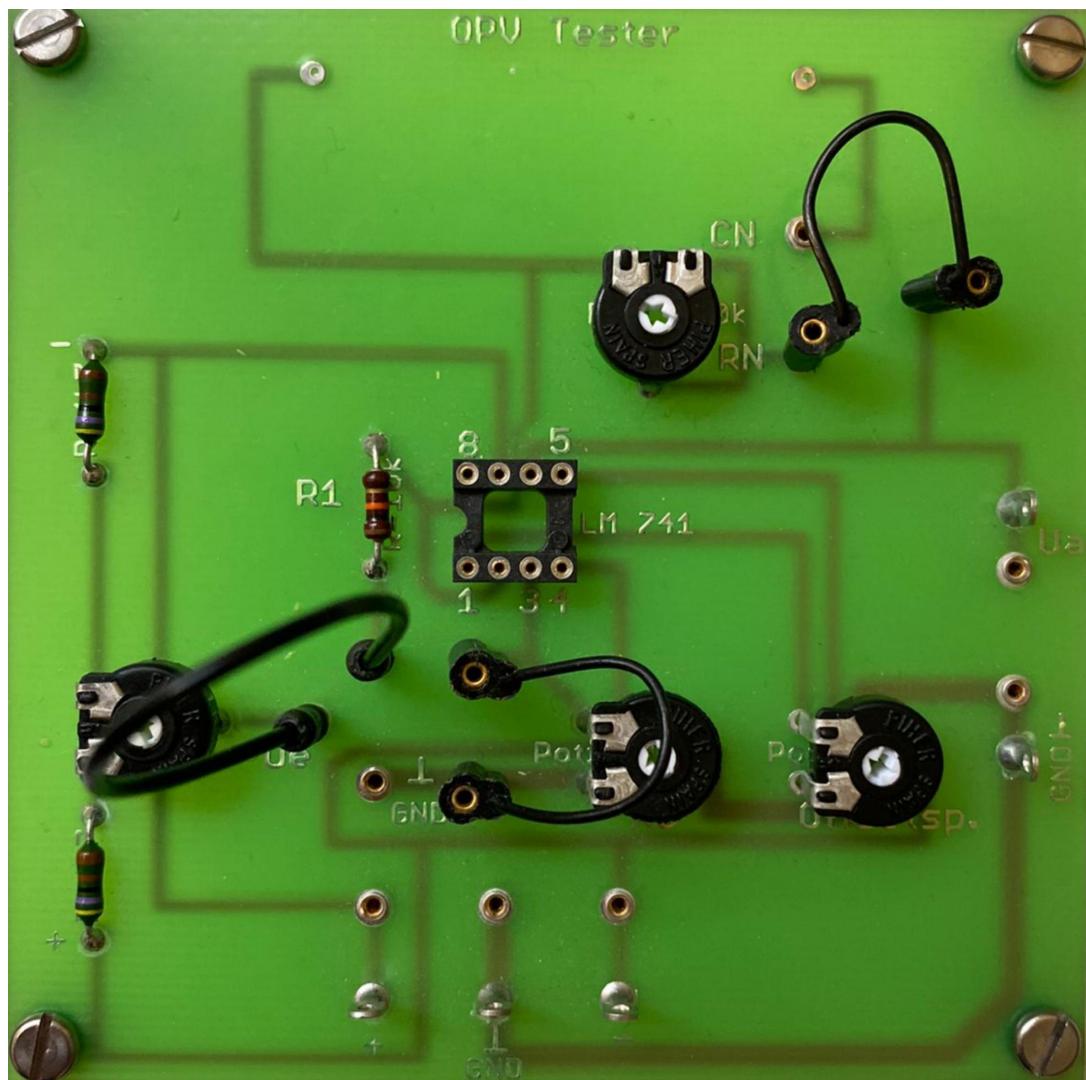


Abbildung 4: Die vorhandene Testschaltung als invertierender Verstärker.

Diese Schaltung wurde verwendet, um zu überprüfen, ob der OPV noch immer die gewünschten Eigenschaften für positive und negative Verstärkungen aufweist. Dies wurde durch Variieren des Offset-Potentiometers bei einer Eingangsspannung von 0 V und dem Messen der Ausgangsspannung überprüft. Da die Ausgangsspannung positiv beziehungsweise negativ durch Drehen des Potentiometers wurde, konnte die Funktionstüchtigkeit bestätigt werden.

Aufbau Im Gegensatz zu der in Abbildung 2 ersichtlichen Schaltung wird am Steckbrett ein Spannungsteiler als 100 mV Spannungsquelle verwendet. Dazu wurden

ein $15,0\text{ k}\Omega$ und ein $14,96\text{ k}\Omega$ Widerstand mit einem $1\text{ k}\Omega$ Potentiometer verwendet um einen wie in Abschnitt 2 ersichtlichen Spannungsteiler zu bauen, welcher an der Betriebsspannung VCC 15 V und der negativen Betriebsspannung $VCC-$ -15 V anliegt, um eine, durch das dritte mittlere Bein des Poti abgreifbare Spannung V_1 zu erzeugen, die mindestens einen durch das Poti einstellbaren Bereich von -500 mV bis 500 mV abdecken kann. Weiters wurden die in der Abbildung 2 ersichtlichen Widerstände $492\text{ k}\Omega$ und $7,8\text{ k}\Omega$ durch folgende E12-Reihe Widerstände $470\text{ k}\Omega$ mit $22\text{ k}\Omega$ und $6,8\text{ k}\Omega$ mit einem $1\text{ k}\Omega$ Poti ersetzt. Das Potentiometer wurde verwendet, um die Ungenauigkeiten der E12 Widerstände beim Verstärkungsfaktor auszubessern zu können.

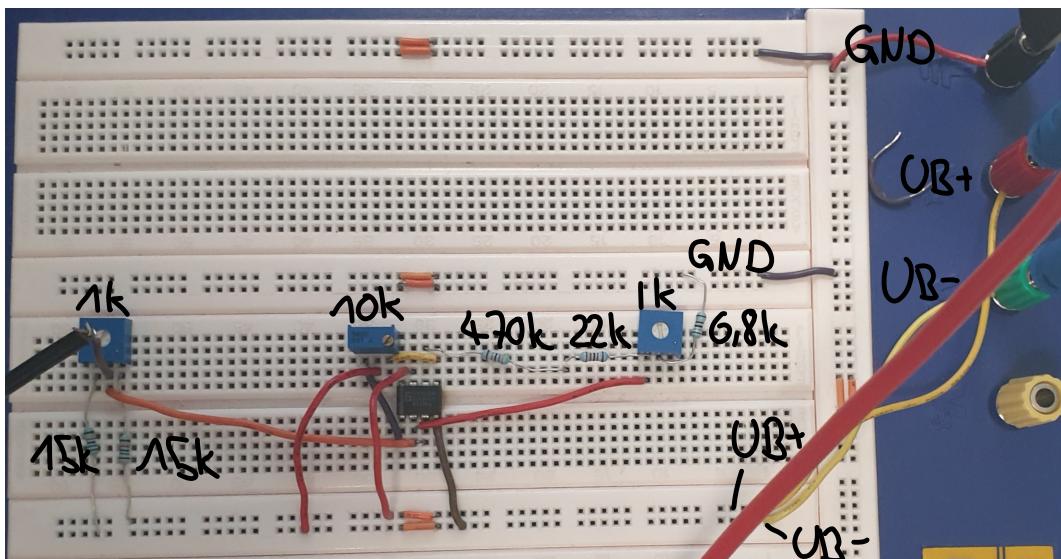


Abbildung 5: Der Aufbau des Elektrometerverstärkers am Steckbrett der Schaltung von Abbildung 2

Offsetabgleich Um den Offsetsspannungsableich durchführen zu können, ist zuerst ein Impedanzwandler aufgebaut worden, wodurch das Abgleichen sich zum Abstimmen der Eingangsspannung zur Ausgangsspannung vereinfachte. Dies wurde durch ein extern beschaltetes Potentiometer bewerkstelligt, welches die Rolle eines Spannungsteilers spielte. Der Offsetabgleich wurde bei einer Spannung von $125,4\text{ mV}$ gemacht.

Beschaltung als Elektrometerverstärker Nun wurde die Rückkopplung durch einen Spannungsteiler, wie in Abbildung 2 ersichtlich, statt dem Kurzschluss vom Ausgang zum invertierenden Eingang, eingebaut. Zunächst gab es Probleme mit

dem Aufnehmen der Verstärkung, da der Ground einen Wackelkontakt aufwies, welcher durch leichtes Drehen des Anschlusses behoben werden konnte. Nun konnte die U_a und U_e des Elektrometerverstärkers gemessen werden. Dies wurde mittels zwei Multimeter [5] bewerkstelligt, indem wie in Abbildung 2 ersichtlich über die Spannungsquelle V_1 und von V_A zu Masse gemessen wurde.

Das Potentiometer im Spannungsteiler erlaubte die Verstärkung genau einzustellen. Jedoch war eine genauere Einstellung schwer per Hand zu bewerkstelligen. Ein digital ansteuerbares Potentiometer wäre hierbei von Nutzen.

$$U_a = 8,03 \text{ V} \quad @ U_e = 125,0 \text{ mV} \quad (2)$$

Untersuchung des Aussteuerungsbereichs Um den Aussteuerungsbereich zu untersuchen, wurde der Eingangsspannungsteiler so dimensioniert, dass dieser an die Grenzen der Verstärkung des OPVs bis zu der Betriebsspannung treiben kann. Da die Eingangsspannung zwischen -500 mV bis 500 mV liegen kann und der Verstärkungsfaktor circa 64 beträgt, ist es leicht möglich bis über die Betriebsspannung hinaus zu verstärken und dadurch den Aussteuerungsbereich des OPVs durch mehrere Messungen der Eingangs- V_1 und Ausgangsspannung V_a untersuchen zu können.

Tabelle 2: Diese Tabelle beinhaltet die gemessenen Ausgangs- und Eingangsspannungen der Elektrometerschaltung, welche der Untersuchung des Aussteuerungsbereichs eines OPVs[6] dienen. Diese Messungen wurden unter Verwendung zweier Multimeter[5], in der Abbildung 2 ersichtlichen Schaltung, durchgeführt.

V_a ... Ausgangsspannung

$V1$... Eingangsspannung

$V1$ / mV	V_a / V
$0,0 \pm 0,2$	$0,0365 \pm 0,0003$
$63,2 \pm 0,3$	$4,082 \pm 0,009$
$121,5 \pm 0,4$	$7,81 \pm 0,04$
$180,7 \pm 0,5$	$11,60 \pm 0,04$
$200,4 \pm 0,6$	$12,86 \pm 0,04$
$225,2 \pm 0,6$	$13,98 \pm 0,05$
$244,8 \pm 0,6$	$13,98 \pm 0,05$
$-62,8 \pm 0,3$	$-3,987 \pm 0,008$
$-117,8 \pm 0,4$	$-7,46 \pm 0,04$
$-176,2 \pm 0,5$	$-11,24 \pm 0,04$
$-233,6 \pm 0,6$	$-13,00 \pm 0,04$
$-290,6 \pm 0,7$	$-13,35 \pm 0,05$
$-298,6 \pm 0,7$	$-13,40 \pm 0,05$
$-340,1 \pm 0,8$	$-13,49 \pm 0,05$

4.2 Integrator

4.2.1 Simulation

Zur Simulation der Integratorschaltung wird das Programm *LTSPICE* verwendet. Der Aufbau erfolgt analog zum skizzierten Schaltplan in Abbildung 6.

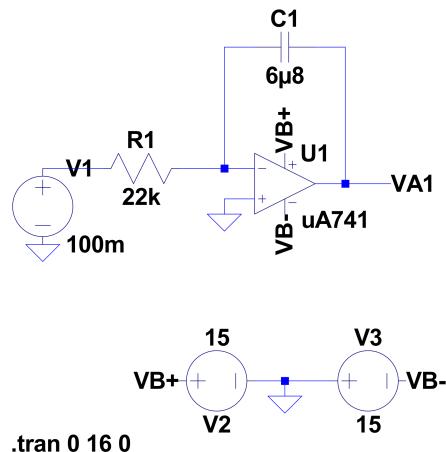


Abbildung 6: Dies ist die Integratororschaltung; aufgebaut in *LTSPICE*

Integrationszeit Um die Integrationszeit, die bei -10 V erreicht wird, zu bestimmen, wurde eine zeitliche Transienten-Analyse durchgeführt, wobei eine konstante Spannungsquelle von 100 mV verwendet wurde. In Abbildung 7 ist die auftretende Ausgangsspannung in Abhängigkeit der Zeit zu sehen.

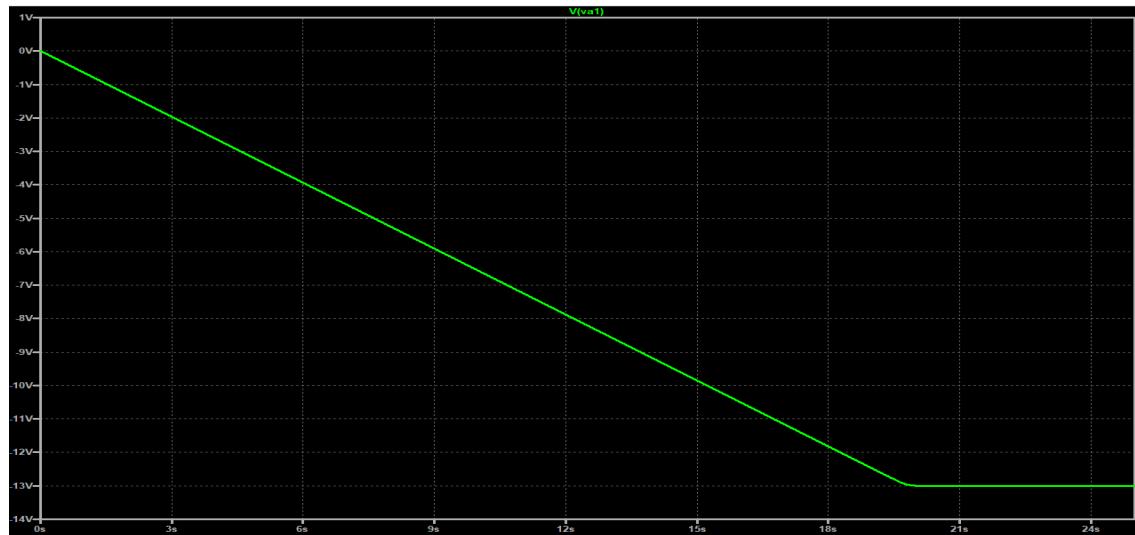


Abbildung 7: Die Schaltung aus Abbildung 6 wurde auf die Integrationszeit untersucht in dem eine Transiente-Analyse vom Ladenvorgang gemacht wurde. Die Simulation SPICE-Directive ist `.tran 0 25 0` bei einer Eingangsspannung $V1$ von 100 mV.

Simulation Verschiedene Eingangssignale Zudem wurde das Verhalten der Schaltung (Abbildung 6) bei verschiedenen Eingangssignalen simuliert. In Abbildung 8 wurde hierfür ein Sinusignal verwendet.

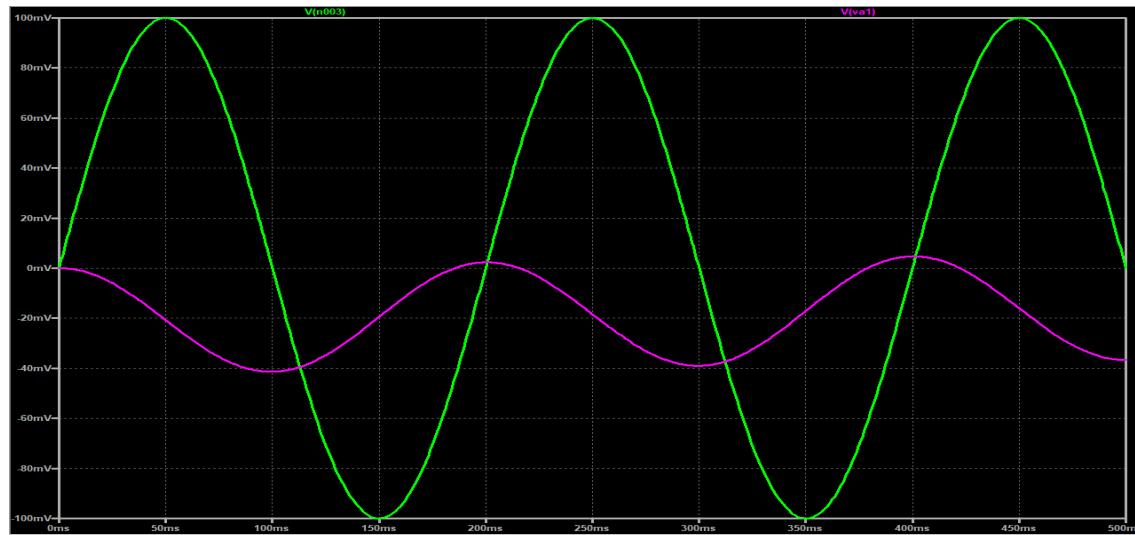


Abbildung 8: Die Simulation eines Sinuseingangssignal(Grün) $V1$ und dessen, durch die Schaltung (Abbildung 6) minus integrierten, Ausgangssignal $V A1$ (Pink) bei einer Frequenz von 5 Hz. Die Einstellungen können dem Oszillogramm direkt entnommen werden.

Nun wurde dasselbe mit einem Dreickseingangssignal, siehe Abbildung 9, gemacht.

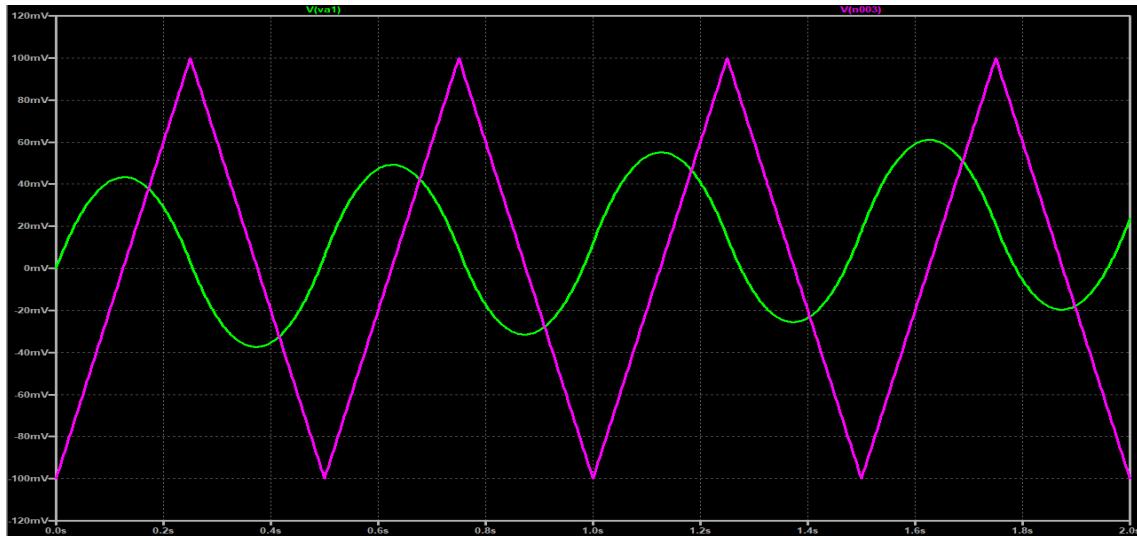


Abbildung 9: Die Simulation eines Dreickseingangssignal(Pink) $V1$ und dessen, durch die Schaltung (Abbildung 6) minus integrierten, Ausgangssignal $VA1$ (Grün) bei einer Frequenz von 2 Hz. Die Einstellungen können dem Oszillogramm direkt entnommen werden.

Als letzter Spannungstyp wurde eine Rechteckspannung, wie in Abbildung 10 ersichtlich, verwendet.

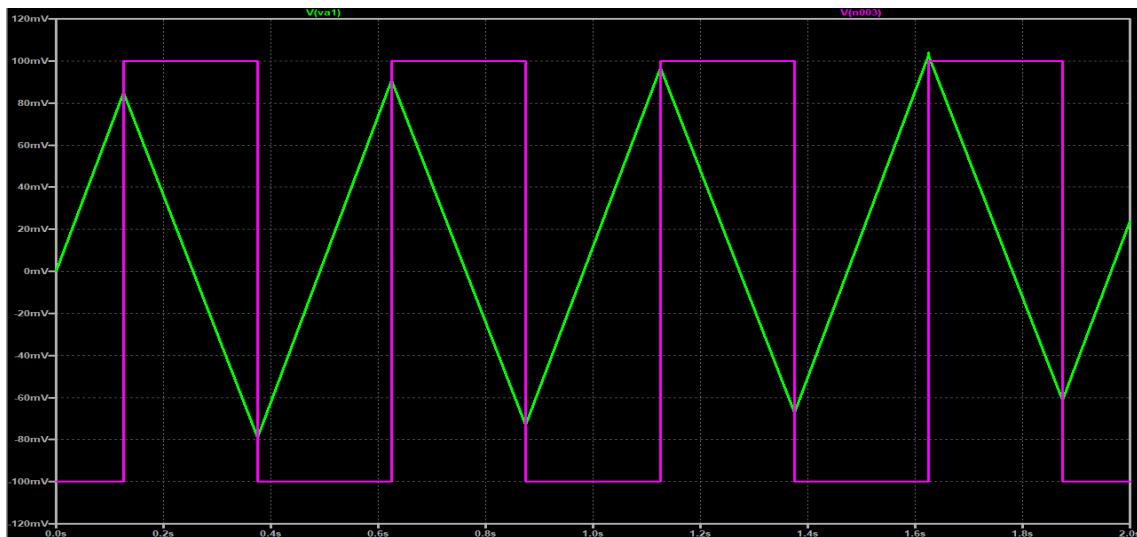


Abbildung 10: Die Simulation eines Rechteckseingangssignal(Pink) $V1$ und dessen, durch die Schaltung (Abbildung 6) minus integrierten, Ausgangssignal $VA1$ (Grün) bei einer Frequenz von 2 Hz. Die Einstellungen können dem Oszillogramm direkt entnommen werden.

Untersuchung der frequenzabhängigen Verstärkung Die Frequenzabhängigkeit der Verstärkung des OPVs wurde durch eine *AC Analysis* in *LTSPICE* simuliert. Das daraus resultierende Bode-Diagramm ist in Abbildung 11 ersichtlich.

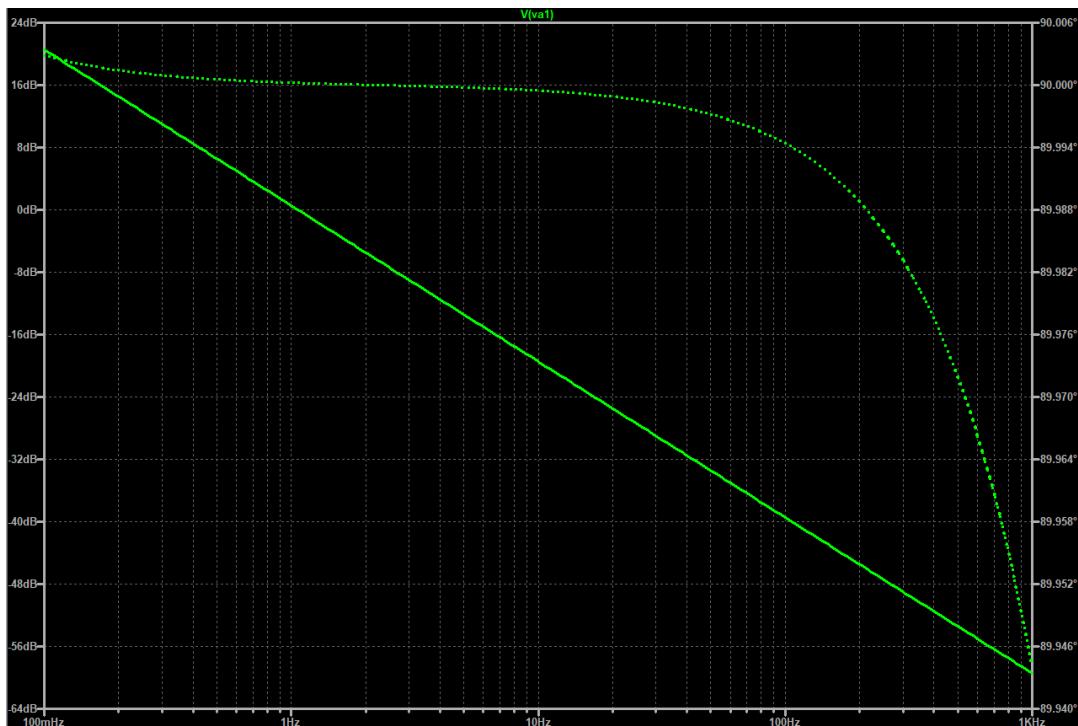


Abbildung 11: Diese Grafik beinhaltet das Bode-Diagramm der Umkehrintegrator-Schaltung aus Abbildung 6. Dies wurde mit folgendem SPICE-Directive simuliert .ac oct 100 0.1 1k

4.2.2 Steckbrett

Wie in Absatz 4.1.2 erklärt, wurde nochmals mit der Impedanzwandlerschaltung die Funktionstüchtigkeit überprüft. Ebenfalls wurde der Offsetabgleich nochmals überprüft. Jedoch musste dieser nicht angepasst werden, da noch immer alles korrekt kalibriert war.

Integrationszeit Nun wurde die charakteristische Integrationszeit der Schaltung bestimmt. Dies wurde getan, indem zuerst der Kondensator, bis das Multimeter am Ausgang 0 mV anzeigen, entladen wurde und danach die Zeit des Ladens, welche die Schaltung brauchte um die geforderte Spannung von -10 V am Ausgang zu haben,

gemessen wurde. Dies wurde 6 mal wiederholt um eine Mittelung der Messergebnisse durchführen zu können.

Tabelle 3: Messungen der Integrationszeit der realen Integratorschaltung aus Abbildung 6, wobei T die Ladezeit ist, bis am Ausgang -10 V anliegt. Bei einer Ladespannung $91,8\text{ mV}$, einem Widerstand von $21,9\text{ k}\Omega$ und einer Kapazität von $6,8\text{ }\mu\text{F}$

T / s
17,20
16,42
16,90
16,89
17,32
17,21

Untersuchung Verschiedene Eingangssignale Nun wurde die Integrationsfähigkeit der Schaltung durch Einspeisen verschiedener Eingangssignale qualitativ untersucht. Dazu wurde zunächst ein Sinuseingangssignal, siehe Abbildung 12, verwendet.

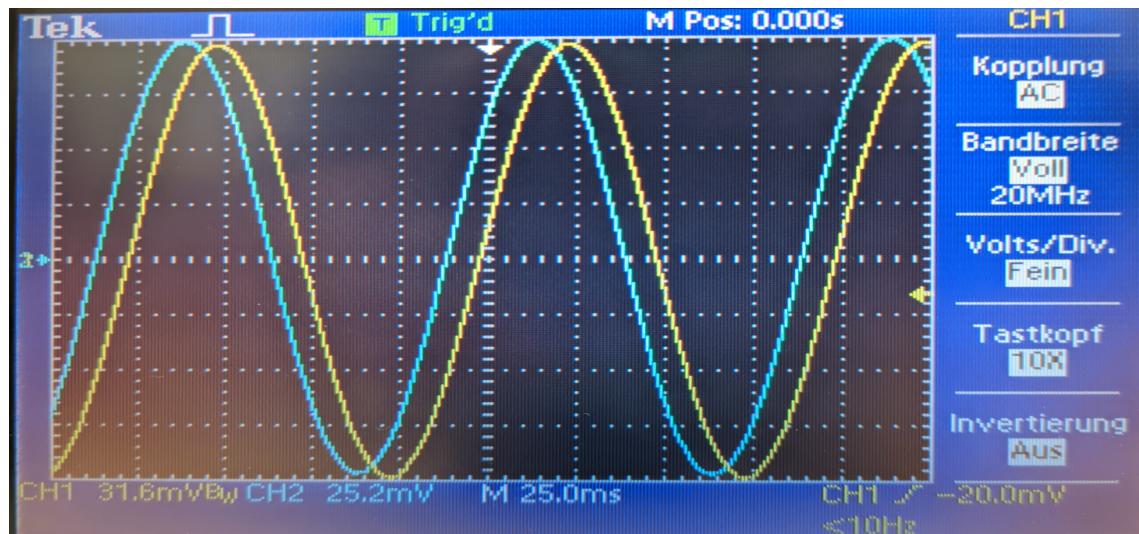


Abbildung 12: Die Aufnahme vom Sinuseingangssignal (Gelb) und dem minus integrierten Ausgangssignal (Blau) bei einer Frequenz von 10 Hz . Die Einstellungen können dem Oszilloskopogramm direkt entnommen werden.

Nun wurde dasselbe mit einem Dreickseingangssignal, siehe Abbildung 13, gemacht.

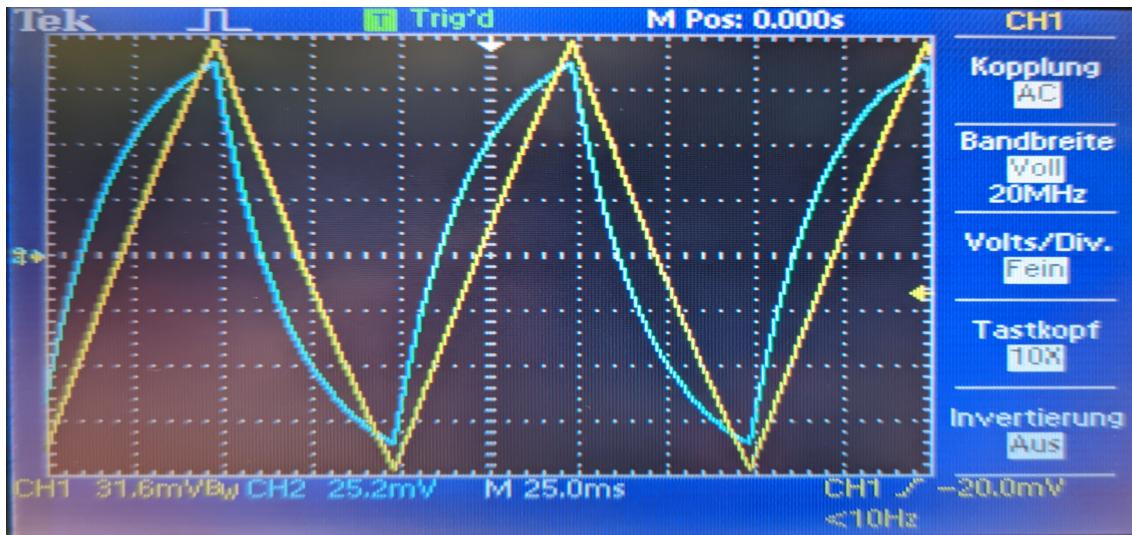


Abbildung 13: Die Aufnahme vom Dreickseingangssignal(Gelb) und dem minus integrierten Ausgangssignal (Blau) bei einer Frequenz von 10 Hz. Die Einstellungen können dem Oszillogramm direkt entnommen werden.

Da der Signalgenerator [2] keine Rechteckspannung erzeugen konnte, konnte der Umkehrintegrator am Steckbrett auch nicht mit einem Rechteckssignal untersucht werden.

Untersuchung der frequenzabhängigen Verstärkung Zur Untersuchung der Frequenzabhängigkeit der Verstärkung des OPVs wurde wie im Kapitel Aufgabenstellung ersichtlich die Frequenz des Sinuseingangssignals von 5 Hz bis 50 Hz in 15er Schritten variiert.

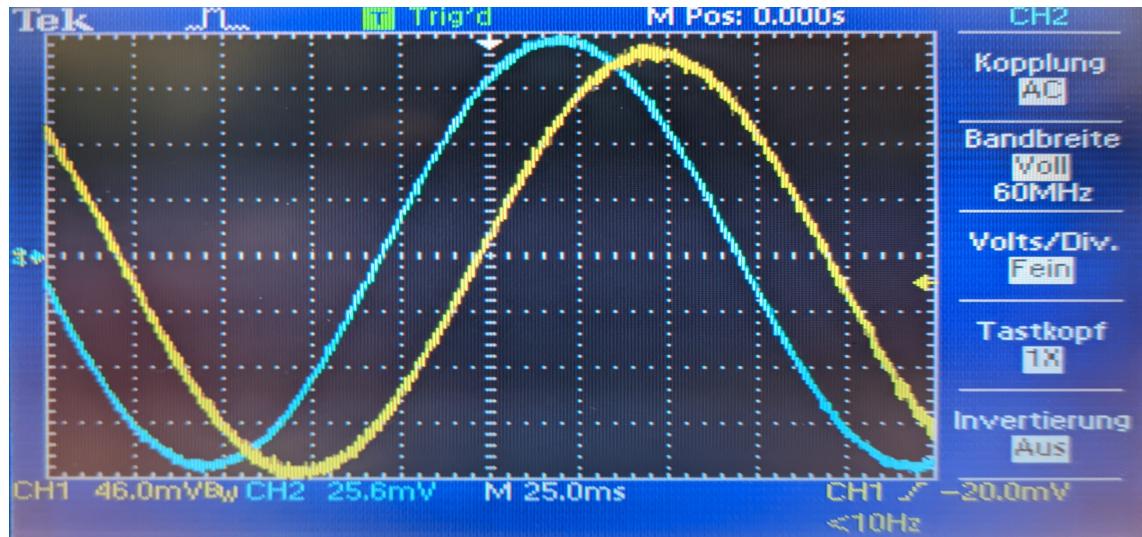


Abbildung 14: In dieser Grafik ist das Sinuseingangssignal(Gelb) bei einer Frequenz von 5 Hz und dessen Ausgangssignal(Blau) ersichtlich.

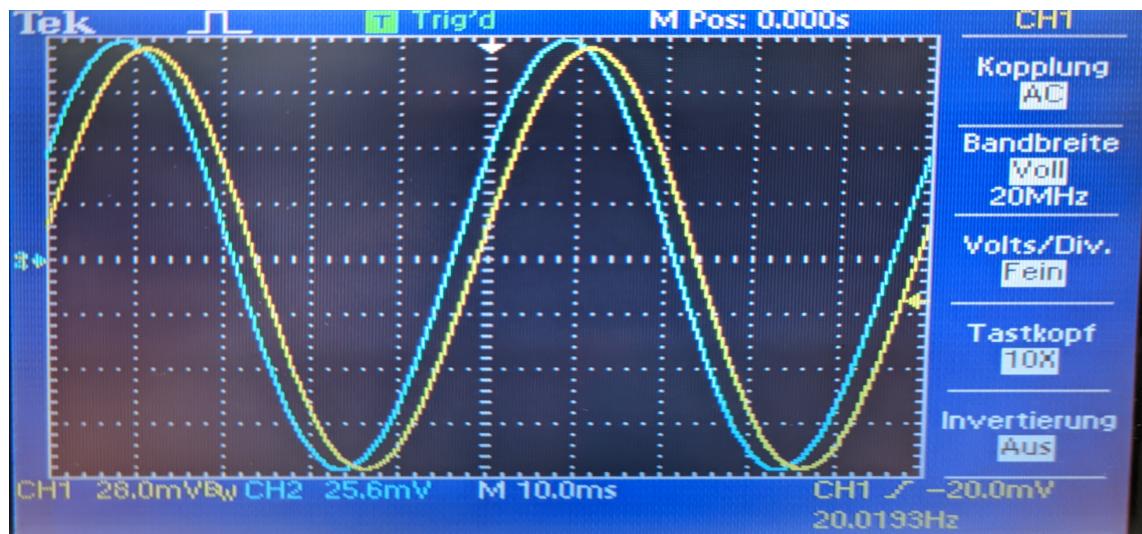


Abbildung 15: In dieser Grafik ist das Sinuseingangssignal(Gelb) bei einer Frequenz von 20 Hz und dessen Ausgangssignal(Blau) ersichtlich.

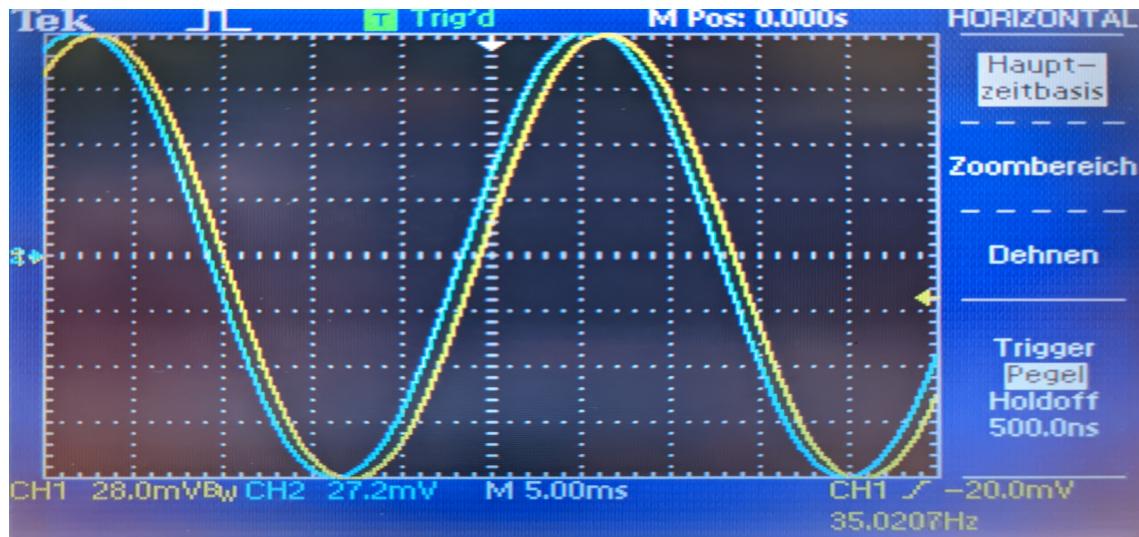


Abbildung 16: In dieser Grafik ist das Sinuseingangssignal(Gelb) bei einer Frequenz von 35 Hz und dessen Ausgangssignal(Blau) ersichtlich.



Abbildung 17: In dieser Grafik ist das Sinuseingangssignal(Gelb) bei einer Frequenz von 50 Hz und dessen Ausgangssignal(Blau) ersichtlich.

4.2.3 Simulation des Integrators mit zusätzlicher Verstärkerstufe

Schlussendlich wird die Integratororschaltung in der Simulation um eine OPV-Verstärkerstufe gemäß Abbildung 18 erweitert, wobei ein zweiter μ A741 als Operationsverstärker in der Verstärkerstufe verwendet wurde.

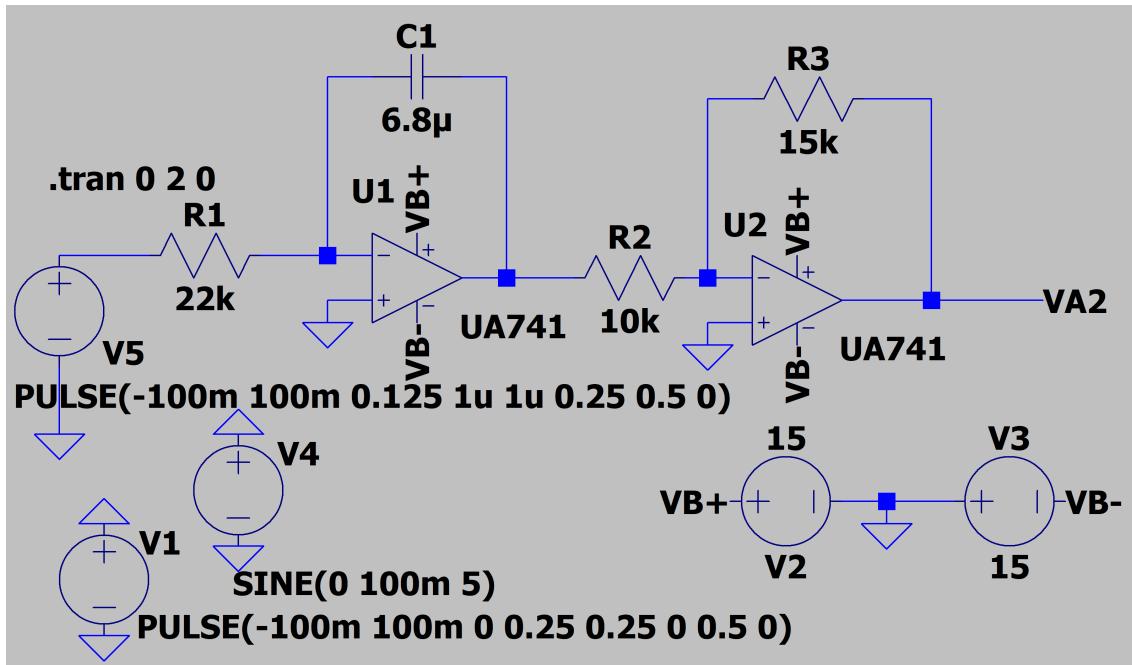


Abbildung 18: Dies ist die Integratorschaltung mit Verstärkerstufe; aufgebaut in *LTSpICE*.

Integrationszeit Die Integrationszeit, nach welcher die Ausgangsspannung 10 V beträgt, wurde erneut graphisch mithilfe einer zeitlichen Transienten-Analyse ermittelt, wobei eine konstante Spannungsquelle von 100 mV verwendet wurde. Die Ausgangsspannung in Abhängigkeit der Zeit ist in Abbildung 19 dargestellt.

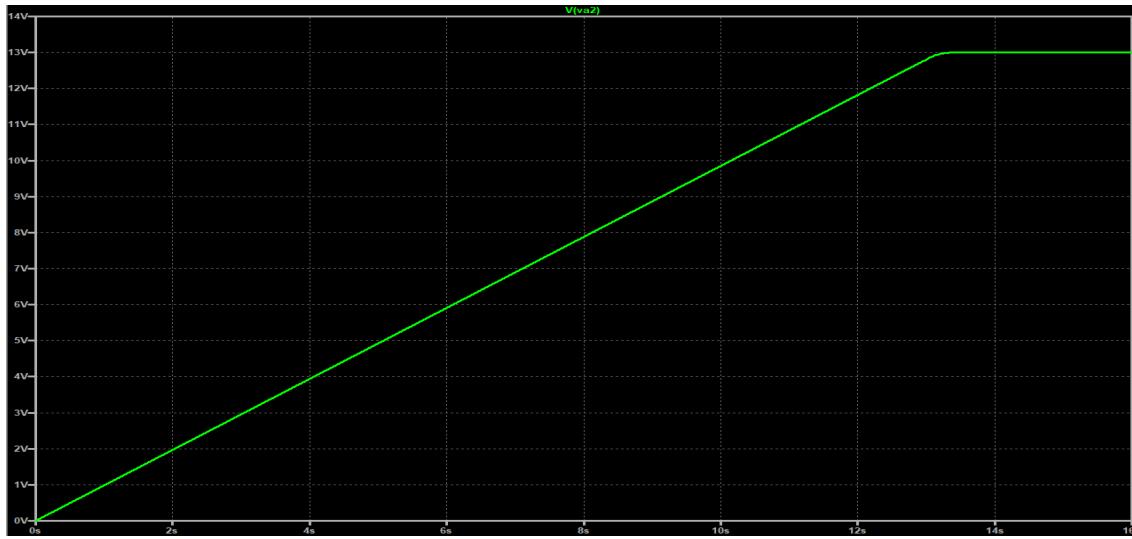


Abbildung 19: Die Schaltung aus Abbildung 6 wurde auf die Integrationszeit untersucht, indem eine Transienten-Analyse vom Ladenvorgang gemacht wurde. Die Simulation SPICE-Directive ist `.tran 0 16 0` bei einer Eingangsspannung U_e von 100 mV.

Untersuchung Verschiedene Eingangssignale Nun wurden wiederum verschiedene Spannungsquellen als Eingangssignal für den Integrator mit Verstärkerstufe verwendet. In Abbildung 20 sind die zeitlichen Verläufe der Eingangs- und Ausgangsspannung bei einem Sinus-Eingangssignal mit einer Amplitude von 100 mV und einer Frequenz 5 Hz von ersichtlich. Analog sind Eingangsspannung und Ausgangsspannung für eine Rechtecksspannung mit einer Amplitude von 100 mV und einer Periodendauer von 500 ms in Abbildung 22 dargestellt. In Abbildung 21 sind die Verläufe von U_e und U_a für eine Dreiecksspannung als Signalquelle zu sehen. Sie weist die gleichen Spezifikationen bezüglich Amplitude und Periodendauer wie das Rechtecksspannungssignal auf.



Abbildung 20: Die Simulation eines Sinuseingangssignal (Pink) und dessen, durch die Schaltung (Abbildung 18) integrierten, Ausgangssignal V_{A2} (Grün) bei einer Frequenz von 5 Hz. Die Einstellungen können dem Oszillosrogramm direkt entnommen werden.

Nun wurde dasselbe mit einem Dreickseingangssignal, siehe Abbildung 13, gemacht.

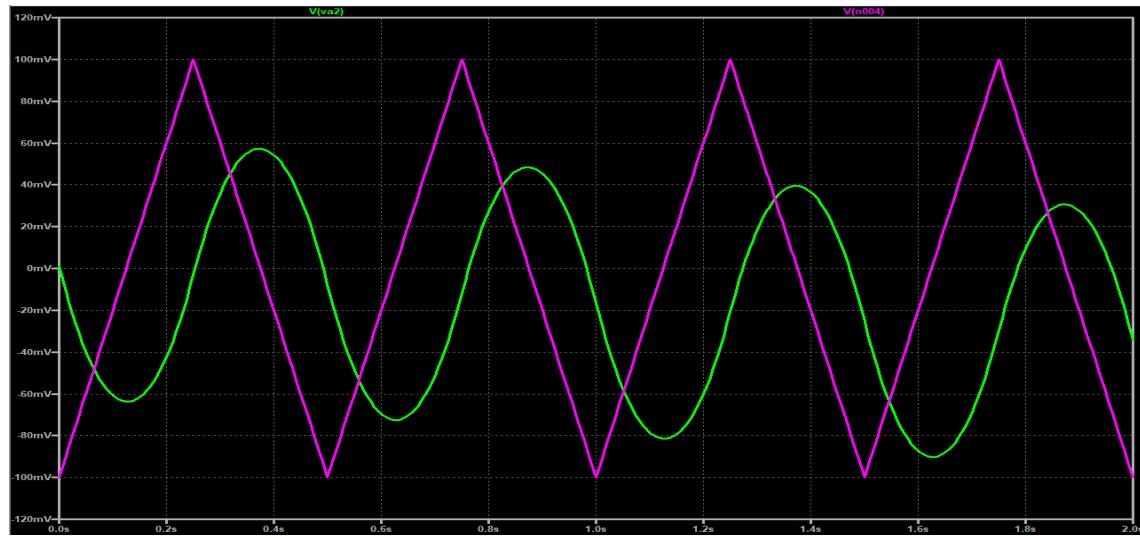


Abbildung 21: Die Simulation eines Dreickseingangssignal (Pink) und dessen, durch die Schaltung (Abbildung 18) integrierten, Ausgangssignal V_{A2} (Grün) bei einer Frequenz von 2 Hz. Die Einstellungen können dem Oszillosrogramm direkt entnommen werden.

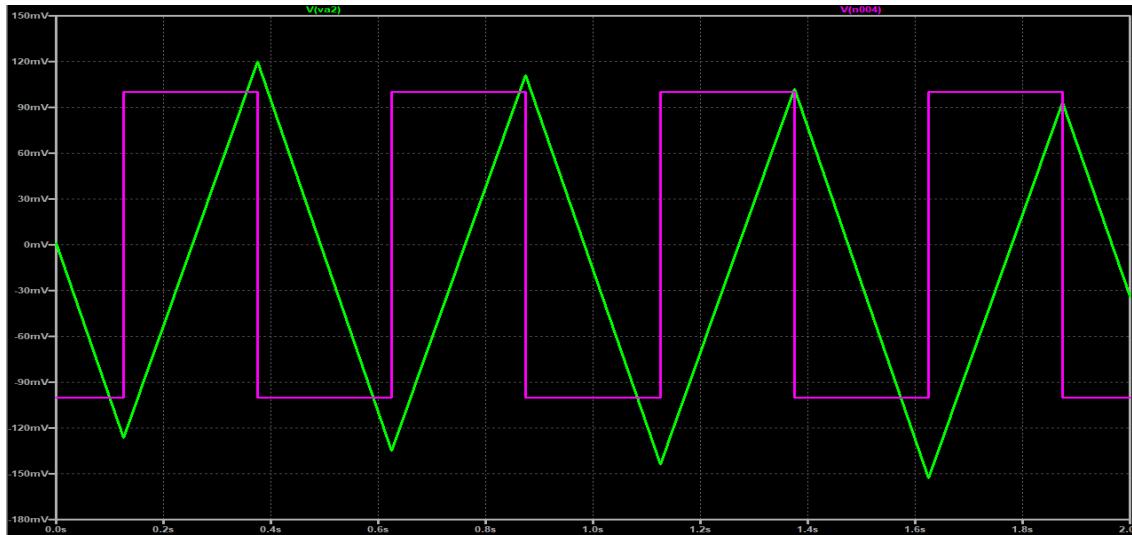


Abbildung 22: Die Simulation eines Rechteckeingangssignal (Pink) und dessen, durch die Schaltung (Abbildung 18) integrierten, Ausgangssignal V_{A2} (Grün) bei einer Frequenz von 2 Hz. Die Einstellungen können dem Oszilloskopogramm direkt entnommen werden.

5 Auswertung

5.1 Elektrometerschaltung

5.1.1 Simulation

Die Verstärkung wurde aus der Steigung der Geraden in der Simulation herausgelesen und beträgt wieder 64.

5.1.2 Steckbrett

Verstärkung & Aussteuerungsbereich Damit die Verstärkung des Elektrometerverstärkers bestimmt werden kann, wurde der lineare Bereich in den Daten aus Tabelle 2 gefittet. Da die Steigung der Verstärkung entspricht, wurde diese verwendet, um die Verstärkung der Schaltung zu finden.

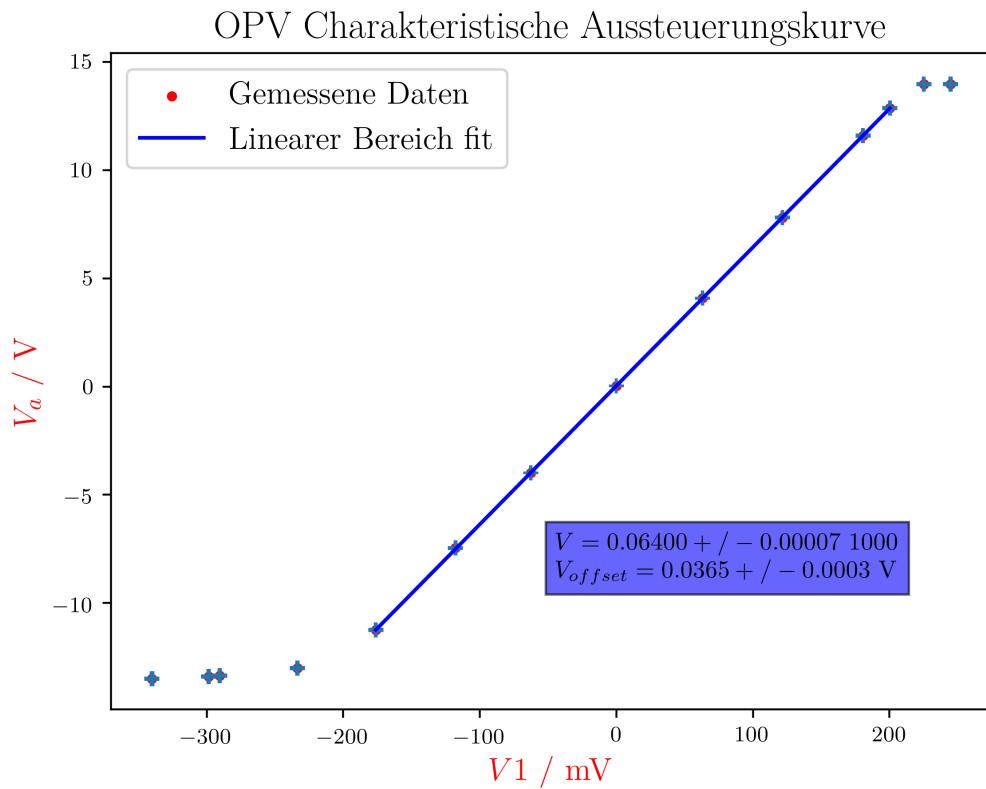


Abbildung 23: Diese Grafik zeigt den gemessenen Aussteuerungsbereich des μA741 OPVs. Auf der Ordinaten-Achse befindet sich die Ausgangsspannung V_a und auf der Abszisse die Eingangsspannung $V1$. Die Daten wurden aus Tabelle 2 entnommen und als Scatterplot dargestellt. Zudem wurde der lineare Operationsbereich des OPVs gefittet um die Verstärkung V der realen Elektrometerschaltung genau bestimmen zu können. Da ein Offset V_{offset} dennoch vorhanden war ist dieser im Fit berücksichtigt worden.

Die Berechnung und grafische Darstellung wurde mit dem selbstgeschriebenen Open-Source-Python-Package `labtool-ex2`[3] gemacht. Aus Abbildung 23 kann die Verstärkung gleich abgelesen werden; dieser hat einen Wert von $64,00 \pm 0,07$.

5.2 Umkehrintegrator

5.2.1 Simulation

Integrationszeit Die Integrationzeit wurde aus Abbildung 7 in der Simulation herausgelesen und beträgt 15,24 s.

5.2.2 Steckbrett

Integrationszeit Die Integrationszeiten aus Tabelle 3 wurden gemittelt und dabei wurde die Streuung der Messung als gaußverteilt angenommen.

$$T = (17,0 \pm 0,4) \text{ s} \quad (3)$$

5.3 Integrator mit Verstärkerstufe

5.3.1 Simulation

Integrationszeit Die Integrationzeit wurde aus Abbildung 19 in der Simulation herausgelesen und beträgt 10,15 s.

6 Diskussion und Zusammenfassung

6.1 Diskussion

6.1.1 Elektrometerverstärker

Aussteuerung Die Aussteuerung eines Operationsverstärkers soll bei einer Ausgangsspannung des 0,6 bis 0,9-fachen der Betriebsspannung erreicht werden, was bei einer Betriebsspannung von $\pm 15 \text{ V}$ eine Spannweite von $\pm 9 \text{ V}$ bis $\pm 13,5 \text{ V}$ ergibt. Wie in Abbildung 3 für den Elektrometerverstärker zu sehen, deckt sich dieser Verhalt mit der Simulation, bei welcher die Aussteuerung ab einer Eingangsspannung von $\pm 200 \text{ mV}$ auftritt, wobei eine maximale Ausgangsspannung von $\pm 13 \text{ V}$ erreicht wird. Der Verlauf ähnelt dabei stark der charakteristischen Kennlinie der Ausgangsspannung eines gewöhnlichen OPVs. Die Sättigungen im Aussteuerungsbereich, die ebenso bei einer Ausgangsspannung von $\pm 13 \text{ V}$ erreicht werden, sind auch anhand der Simulationen der Integrationszeit der Integratorschaltung in Abbildung 7 für die

Schaltung ohne respektive in Abbildung 19 für die Schaltung mit Verstärkerstufe deutlich zu erkennen. Der Aussteuerungsbereich ist hierbei also konsistent.

Die Messung der Ausgangsspannung unter Variation der Eingangsspannung am Steckbrett ergibt, wie in Abbildung 23 zu sehen, einen qualitativ sehr ähnlichen Verlauf der Datenpunkte. Dabei tritt die Sättigung ab einer Eingangsspannung von etwa ± 220 V auf, wobei die maximale Ausgangsspannung auf der positiven Achse ca. 13,9 V und auf der negativen $-13,5$ V beträgt. Diese geringfügigen Abweichungen von der Simulation sind wohl auf das reale Verhalten der Schaltung (u.a. Temperaturabhängigkeit der Bauelemente) zurückzuführen und so zu erwarten gewesen. Der Bereich zwischen den Aussteuerungsgrenzen zeigt das charakteristische, lineare Verhalten und liefert als Steigung $64,00 \pm 0,07$. Dies deckt sich mit der in der Aufgabenstellung (siehe Abschnitt 1 geforderten Verstärkung von 64.

Ausgangsspannung Steckbrett Ziel der Elektrometerverstärker-Schaltung war eine Eingangsspannung von 125 mV in eine Ausgangsspannung von 8 V umzuwandeln. Dies wurde am Steckbrett gemäß Gleichung 2 mit ähnlich hoher Genauigkeit wie bei der Simulation erzielt. Die Abweichung beträgt demzufolge nur 30 mV, was bei einer Größenordnung von mehreren Volt vernachlässigbar ist und eine ausreichende Genauigkeit gewährleistet.

6.1.2 Integrator

Integrationszeit Die in der Simulation für den Integrator ohne Verstärkerstufe bestimmte Integrationsdauer von 15,24 s (siehe Abbildung 7), die verging bis eine anvisierte Ausgangsspannung von -10 V erreicht wurde, weicht kaum von den Werten der Vorbereitung (siehe Abschnitt 2) ab. Dabei sollte für die gegebene konstante Spannungsquelle von 100 mV die Integrationszeit 15 s betragen. Im Rahmen des Versuchs an der Steckplatine ergab sich bei mehrmaliger Durchführung ein Wert von $(17,0 \pm 0,4)$ s. Gemäß Gleichung 4 hätte die Messreihe zu geringeren Integrationszeiten führen sollen, welche damit näher an der in der Aufgabenstellung vorgegebenen Integrationszeit für den Umkehrintegrator lägen. Dies deutet möglicherweise auf einen systematischen Fehler hin, der allerdings auch von den Laborbetreuern nicht erkannt worden ist.

$$T = \frac{U_a R C}{U_e} = \frac{10\ 21\ 900\ 6,8 \cdot 10^{-6}}{0,0918} \text{ s} = (16,3 \pm 0,3) \text{ s} \quad (4)$$

Für die Integratorschaltung mit Verstärkerstufe sollte gemäß der Vorbereitung in Abschnitt 2 bei einer Eingangsspannung von 100 mV nach 10 s eine Ausgangsspannung von 10 V erreicht werden. Mittels der Simulation wurde die Integrationszeit zu 10,15 s

aus Abbildung 19 bestimmt. Abgesehen von der erneut nur marginalen Abweichung von 0,15 s, die wohl auf die Näherungen der Widerstände zurückgeführt werden könnte, impliziert dies, dass die Schaltung wie geplant funktioniert und erfolgreich konstruiert respektive dimensioniert wurde.

Spannungsarten Die Eingangs- und Ausgangsspannungen für ein Sinussignal sind in Abbildung 8 für die Simulation des Umkehrintegrators, in Abbildung 20 für die Simulation inklusive Verstärkerstufe und in Abbildung 12 als Oszillogramm für den Umkehrintegrator am Steckbrett zu sehen. Dabei ist das Integrieren der Eingangsfunktion, was zu einer Kosinus-Spannung am Ausgang führt - wie auch in der Vorbereitung hergeleitet - insbesondere anhand der Simulationen gut zu erkennen. Am Oszillogramm ist zwar eine Phasenverschiebung zwischen dem Eingangs- und Ausgangssignal evident, allerdings entspricht diese nicht einer zu erwartenden von $\frac{\pi}{2}$ wie sie zwischen Sinus und Kosinus auftritt.

Für Dreieckssignale am Eingang ergibt sich Abbildung 9 für den simulierten Umkehrintegrator, Abbildung 21 für die Simulation mit Verstärkerstufe respektive Abbildung 13 für den Umkehrintegrator am Steckbrett. Erneut folgen die Resultate der Simulation dem in der Vorbereitung hergeleiteten Zusammenhang (siehe Abschnitt 2), nämlich dass sich die Dreieckssignale zu parabolischen Ausgangssignalen integrieren. Die steigende Flanke ergibt sich auch für den Umkehrintegrator der Steckplatine analog zu einem steigenden parabolischen Verhalten; für die fallende scheint allerdings ein invertiertes parabolisches Verhalten der Ausgangsspannung zu resultieren, was stark an die Entladekurve eines Kondensators erinnert.

Rechteckssignale (bestehend aus Konstanten) als Eingangsspannung ergeben wiederum das erwartete aufintegrierte Verhalten einer Dreiecksspannung (aus linearen Anstiegen und Abfällen bestehend) als Ausgangsspannung für den simulierten Umkehrintegrator (siehe Abbildung 10) und jenem mit zusätzlicher Verstärkerstufe (siehe Abbildung 22).

Frequenzabhängigkeit Anhand des Bode-Diagramms der Simulation für die Umkehrintegratorschaltung in Abbildung 11 ist das auch in der Vorbereitung (siehe Abschnitt 2) bestimmte Frequenzverhalten, nämlich die starke Abnahme der Spannungsverstärkung mit zunehmender Frequenz evident. Am Steckbrett ergab die Variation der Frequenz von 5 Hz bis 50 Hz, gemäß Abbildung 14 bis Abbildung 17, einen größeren Phasenversatz von Eingangs- zu Ausgangsspannung für niedrigere Frequenzen.

6.2 Zusammenfassung

Das Verhalten der Ausgangsspannung unter Variation der Eingangsspannung folgt sowohl für die Simulation als auch beim Versuch an der Steckplatine der zur erwarteten charakteristischen Kennlinie eines gewöhnlichen Operationsverstärkers (siehe Abbildung 3 und Abbildung 23).

Die Integrationszeiten in der Simulation für die Umkehrintegratorschaltung und den Integrator mit Verstärkerstufe ergaben jeweils nur marginale, zu vernachlässigbare Abweichungen im Bereich von wenigen 0,1 s. Für die Integrationszeit des Umkehrintegrators am Steckbrett ergab sich eine Diskrepanz von mehr als 1,5 s, die systematischer Natur gewesen zu sein scheint.

Literaturverzeichnis

- [1] *Digital Storage Oscilloscopes. TDS1000 Series • TDS2000 Series.* en. Fluke Corporation. 2005. URL: https://download.tek.com/datasheet/3GW_15314_6.pdf (besucht am 11.05.2022).
- [2] *HT FG250D Function generator to 250 kHz.* en. Fluke Corporation. 2010. URL: https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/D100/HT_FG250D_MANUAL_DE.pdf (besucht am 11.05.2022).
- [3] *Lab-Tool - A Python based lab-data visualization tool.* original-date: 2021-07-09T09:48:13Z. Jan. 2022. URL: <https://github.com/Bierbunker/Lab-Tool> (besucht am 13.05.2022).
- [4] Ulrich Tietze, Christoph Schenk und Eberhard Gamm. *Halbleiter-Schaltungstechnik.* Springer-Verlag GmbH, 5. Juli 2019. ISBN: 3662485532. URL: https://www.ebo-ok.de/de/product/37063433/ulrich_tietze_christoph_schenk_eberhard_gamm_halbleiter_schaltungstechnik.html.
- [5] *Users Manual. 175, 177, 179 True-rms Multimeters.* en. Fluke Corporation. 2003. URL: https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/175_____umeng0200.pdf (besucht am 24.04.2022).
- [6] *μA741 General-Purpose Operational Amplifiers.* en. Fluke Corporation. 2018. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ua741.pdf> (besucht am 11.05.2022).

Abbildungsverzeichnis

1	Schematische Darstellung der Pinbelegung eines klassischen Operationsverstärkers. Hierbei bezeichnet 2 den invertierenden, 3 den nicht-invertierenden Eingangskanal, 6 den Ausgang, 4 den Anschluss für die negative sowie 7 den Anschluss für die positive Betriebsspannung, 1 und 5 die Pins für den Offsetabgleich und 8 einen freien Pin. [4]	12
2	Dies ist die Elektrometerverstärkerschaltung; aufgebaut in <i>LTSPICE</i> .	14
3	Die Schaltung aus Abbildung 2 wurde auf den Aussteuerungsbereich untersucht, indem ein DC-Sweep durchgeführt wurde. Hier ist die Ausgangsspannung <i>VA</i> über die Eingangsspannung <i>V1</i> aufgetragen. Die SPICE-Directive der Simulation ist .dc V1 -0.3 0.3 0.01 . . .	15
4	Die vorhandene Testschaltung als invertierender Verstärker.	16
5	Der Aufbau des Elektrometerverstärkers am Steckbrett der Schaltung von Abbildung 2	17

6	Dies ist die Integratorschaltung; aufgebaut in <i>LTSPICE</i>	20
7	Die Schaltung aus Abbildung 6 wurde auf die Integrationszeit untersucht in dem eine Transiente-Analyse vom Ladevorgang gemacht wurde. Die Simulation SPICE-Directive ist <code>.tran 0 25 0</code> bei einer Eingangsspannung V_1 von 100 mV.	20
8	Die Simulation eines Sinuseingangssignal(Grün) V_1 und dessen, durch die Schaltung (Abbildung 6) minus integrierten, Ausgangssignal VA_1 (Pink) bei einer Frequenz von 5 Hz. Die Einstellungen können dem Oszilloskopogramm direkt entnommen werden.	21
9	Die Simulation eines Dreickseingangssignal(Pink) V_1 und dessen, durch die Schaltung (Abbildung 6) minus integrierten, Ausgangssignal VA_1 (Grün) bei einer Frequenz von 2 Hz. Die Einstellungen können dem Oszilloskopogramm direkt entnommen werden.	22
10	Die Simulation eines Rechteckeingangssignal(Pink) V_1 und dessen, durch die Schaltung (Abbildung 6) minus integrierten, Ausgangssignal VA_1 (Grün) bei einer Frequenz von 2 Hz. Die Einstellungen können dem Oszilloskopogramm direkt entnommen werden.	22
11	Diese Grafik beinhaltet das Bode-Diagramm der Umkehrintegrator-Schaltung aus Abbildung 6. Dies wurde mit folgendem SPICE-Directive simuliert <code>.ac oct 100 0.1 1k</code>	23
12	Die Aufnahme vom Sinuseingangssignal (Gelb) und dem minus integrierten Ausgangssignal (Blau) bei einer Frequenz von 10 Hz. Die Einstellungen können dem Oszilloskopogramm direkt entnommen werden.	24
13	Die Aufnahme vom Dreickseingangssignal(Gelb) und dem minus integrierten Ausgangssignal (Blau) bei einer Frequenz von 10 Hz. Die Einstellungen können dem Oszilloskopogramm direkt entnommen werden.	25
14	In dieser Grafik ist das Sinuseingangssignal(Gelb) bei einer Frequenz von 5 Hz und dessen Ausgangssignal(Blau) ersichtlich.	26
15	In dieser Grafik ist das Sinuseingangssignal(Gelb) bei einer Frequenz von 20 Hz und dessen Ausgangssignal(Blau) ersichtlich.	26
16	In dieser Grafik ist das Sinuseingangssignal(Gelb) bei einer Frequenz von 35 Hz und dessen Ausgangssignal(Blau) ersichtlich.	27
17	In dieser Grafik ist das Sinuseingangssignal(Gelb) bei einer Frequenz von 50 Hz und dessen Ausgangssignal(Blau) ersichtlich.	27
18	Dies ist die Integratorschaltung mit Verstärkerstufe; aufgebaut in <i>LTSPICE</i>	28
19	Die Schaltung aus Abbildung 6 wurde auf die Integrationszeit untersucht, indem eine Transienten-Analyse vom Ladevorgang gemacht wurde. Die Simulation SPICE-Directive ist <code>.tran 0 16 0</code> bei einer Eingangsspannung U_e von 100 mV.	29

20	Die Simulation eines Sinuseingangssignal (Pink) und dessen, durch die Schaltung (Abbildung 18) integrierten, Ausgangssignal VA2 (Grün) bei einer Frequenz von 5 Hz. Die Einstellungen können dem Oszillogramm direkt entnommen werden.	30
21	Die Simulation eines Dreickseingangssignal (Pink) und dessen, durch die Schaltung (Abbildung 18) integrierten, Ausgangssignal VA2 (Grün) bei einer Frequenz von 2 Hz. Die Einstellungen können dem Oszillogramm direkt entnommen werden.	30
22	Die Simulation eines Rechteckseingangssignal (Pink) und dessen, durch die Schaltung (Abbildung 18) integrierten, Ausgangssignal VA2 (Grün) bei einer Frequenz von 2 Hz. Die Einstellungen können dem Oszillogramm direkt entnommen werden.	31
23	Diese Grafik zeigt den gemessenen Aussteuerungsbereich des μ A741 OPVs. Auf der Ordinaten-Achse befindet sich die Ausgangsspannung V_a und auf der Abszisse die Eingangsspannung V_1 . Die Daten wurden aus Tabelle 2 entnommen und als Scatterplot dargestellt. Zudem wurde der lineare Operationsbereich des OPVs gefittet um die Verstärkung V der realen Elektrometerschaltung genau bestimmen zu können. Da ein Offset V_{offset} dennoch vorhanden war ist dieser im Fit berücksichtigt worden.	32

Tabellenverzeichnis

1	Tabelle der verwendeten Geräte	13
2	Diese Tabelle beinhaltet die gemessenen Ausgangs- und Eingangsspannungen der Elektrometerschaltung, welche der Untersuchung des Aussteuerungsbereichs eines OPVs[6] dienen. Diese Messungen wurden unter Verwendung zweier Multimeter[5], in der Abbildung 2 ersichtlichen Schaltung, durchgeführt. V_a . . . Ausgangsspannung V_1 . . . Eingangsspannung	19
3	Messungen der Integrationszeit der realen Integratorschaltung aus Abbildung 6, wobei T die Ladezeit ist, bis am Ausgang -10 V anliegt. Bei einer Ladespannung $91,8\text{ mV}$, einem Widerstand von $21,9\text{ k}\Omega$ und einer Kapazität von $6,8\text{ }\mu\text{F}$	24