

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 . . . . .	13
4.1.1	Simulation . . . . .	13
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
6	Diskussion und Zusammenfassung . . . . .	33
6.1	Diskussion . . . . .	33
6.1.1	Elektrometerverstärker . . . . .	33
6.1.2	Integrator . . . . .	34
6.2	Zusammenfassung . . . . .	34

**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

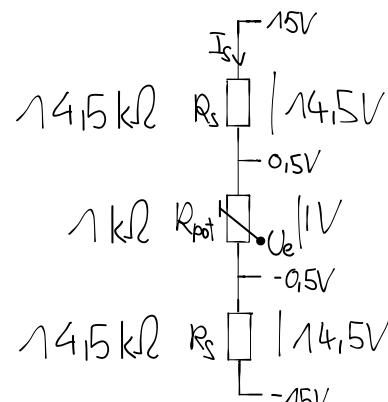
$$f_g = \frac{f_T}{|A|} = \frac{10^6\text{Hz}}{64} = 15,6\text{kHz}$$

Ausgangswiderstand

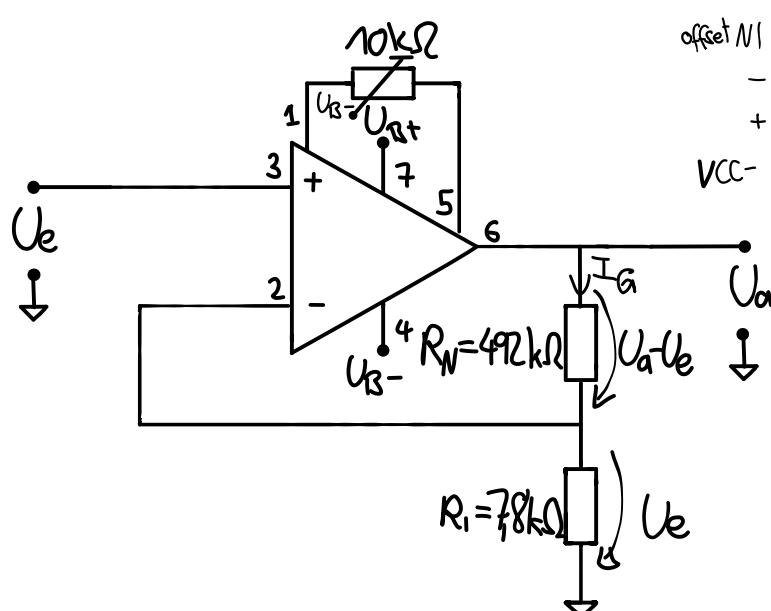
$$r_a = \frac{U_a}{I_a} \approx \frac{V_a, \text{datasheet}}{|g|} = 0,64\Omega$$

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

10 kΩ 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 differential input stage of the opamp circuit. This can be done by connecting 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 offset cancellation. For more information about designing using the input offset pins, see Using Input Offset Pins of Operational Amplifiers.

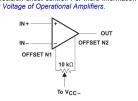


Figure 12. Input Offset Voltage Null Circuit

### B) Integrator

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

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

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

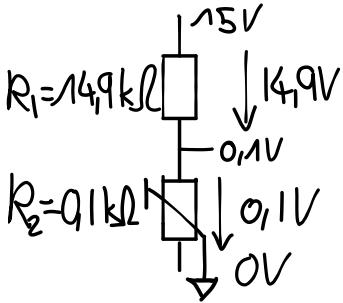
$$U_a(t) = -\frac{U_e t}{RC}$$

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

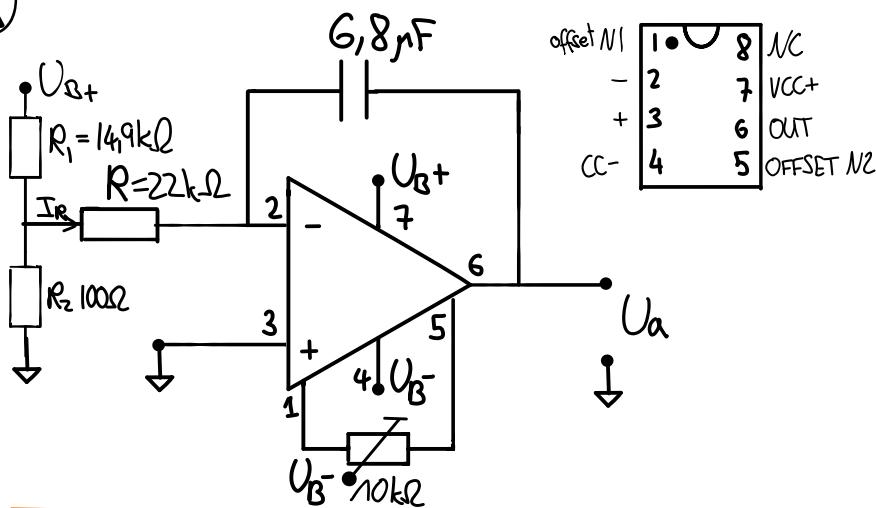
$$2) I_S \gg I_R \approx 4mA$$

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

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



3)



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

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

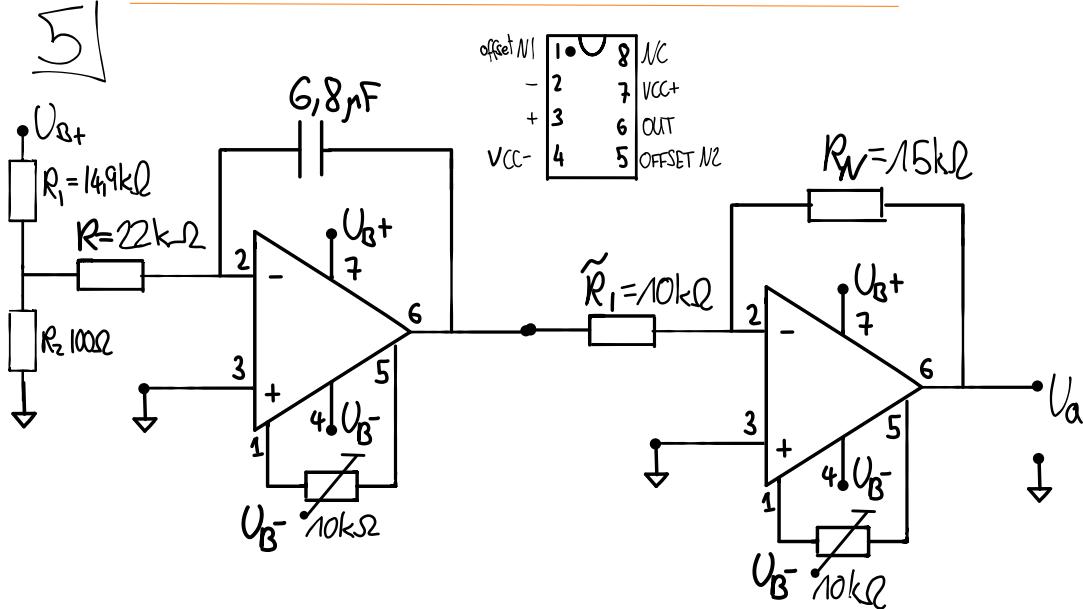
$$A = -\frac{R_N}{R_1} = \frac{U_a}{U_e} = -\frac{10V}{-6,68V} = -1,496 \approx -\frac{3}{2}$$

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

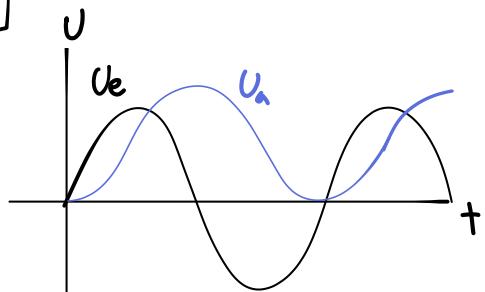
$$R_N = 15k\Omega$$

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

5)

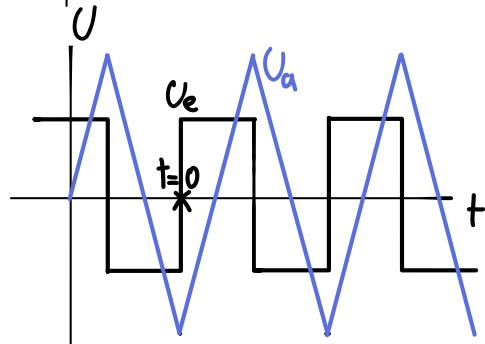


6)



Begründung

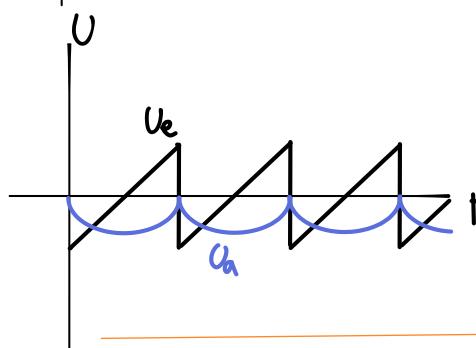
$$\int_0^t \sin(\omega t) dt = \frac{1}{\omega} \cos(\omega t)$$



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

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

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



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

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

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

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

$$U_e = U_R$$

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

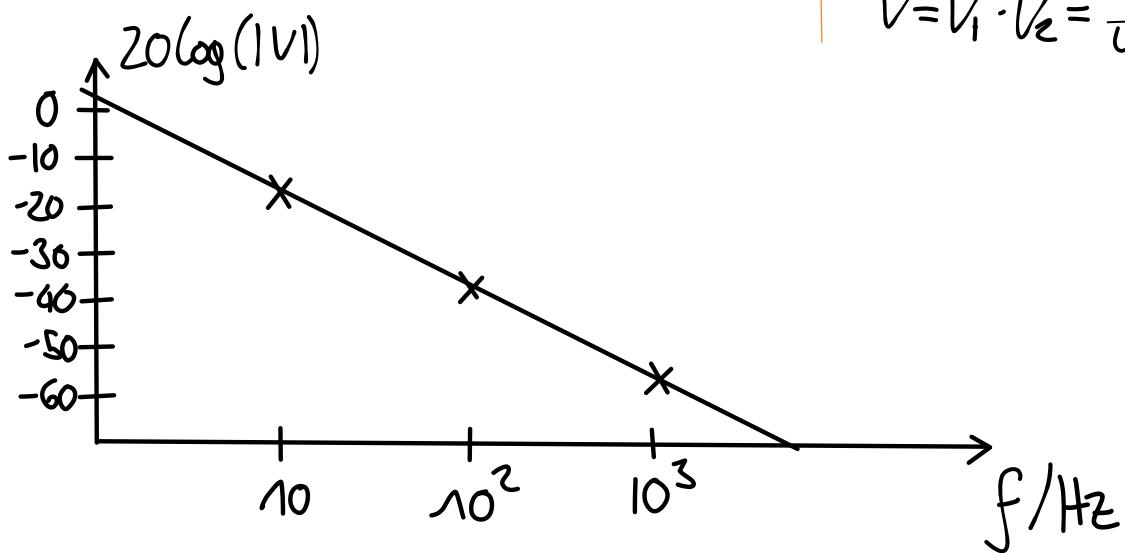
$$U_C = X_C \cdot I_C = -\frac{U_R}{\omega R C}$$

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

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)

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

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

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

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

$$(R_L = \frac{U_a}{I_a})$$

$$\hookrightarrow \text{E12: } (470+22)\text{k}\Omega$$

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

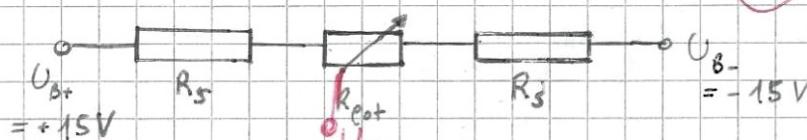
$$r_a = r_{ao} \cdot \frac{A}{A_D} \quad \text{mit } A = \frac{U_a}{U_e} = 64 \quad \text{Verst.} \\ \text{und } A_D = 10^5 \quad \text{Diff. verst.} \\ r_{ao} = 1 \text{ k}\Omega$$

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

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

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

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  $I_s \gg I_a$

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

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

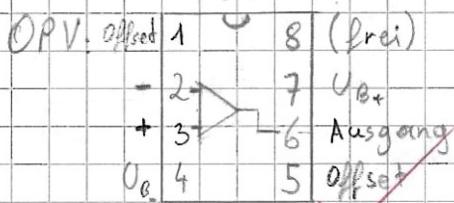
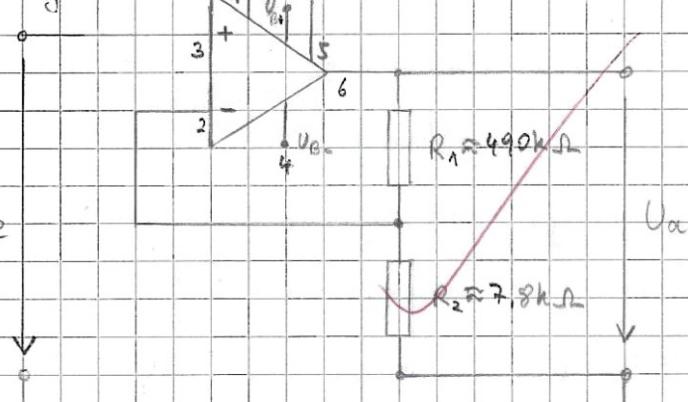
Es können nicht beliebig große Widerstände verwendet werden, da der Strom zu gering werden würde (Ohm'sches Gesetz), wodurch  $I_s \gg I_a$  nicht mehr unbedingt gelten würde.

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:

$I_e + I_c = 0$

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

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

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

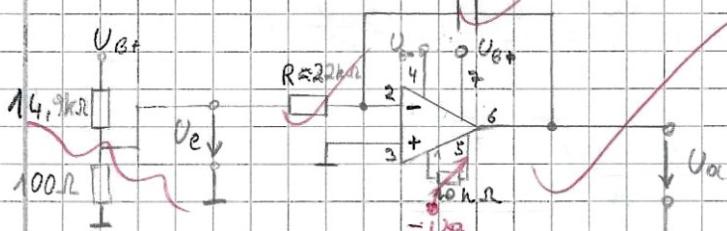
## 2.) Dimensionierung Spannungssteiler

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

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

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

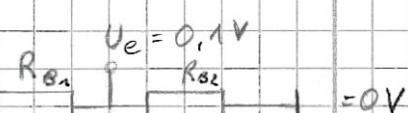
## 3.)



Offset 1 8 (frei)

invertierender Eingang 2 7  $U_{B+}$ 

nicht invertierender Eingang 3 Ausgang

 $U_B$  4 5 Offset

$I_e$  gegenüber  $I_s$   
vernachlässigbar

siehe Korr von  
Gruppenkollege

Seite: 2/4

40

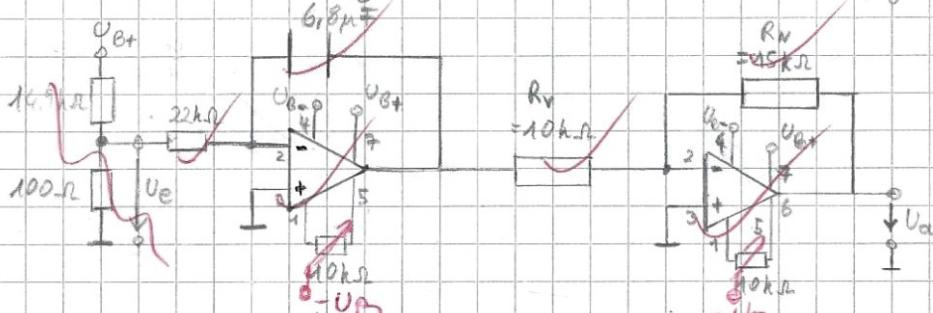
$$U_{a_m}(10s) = -\frac{U_0 \cdot t}{RC} = -6,67 V$$

erfordert nachgelagerte Invertierung

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

$$\begin{aligned} R_V &= 10k\Omega \quad (\text{schon in Schaltung} \\ R_N &= 15k\Omega \quad \text{verwendet}) \end{aligned}$$

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



Pinreihenfolge analog wie in A4) & B3)

## 6) Sinus - Eingangssignal:

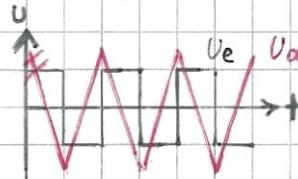
Achtung, zu Beginn  
ist ~~E-Mail~~ laden

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



Das Integral des "sin" liefert  
 $-\cos$  und durch zusätzlicher 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 interpretieren sich zu Parabeln ( $Sxt + dt = x \frac{t^2}{2} + C$ ).

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

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

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

$$U_c = -X_c \cdot I_c = -\frac{U_o}{wRC}$$

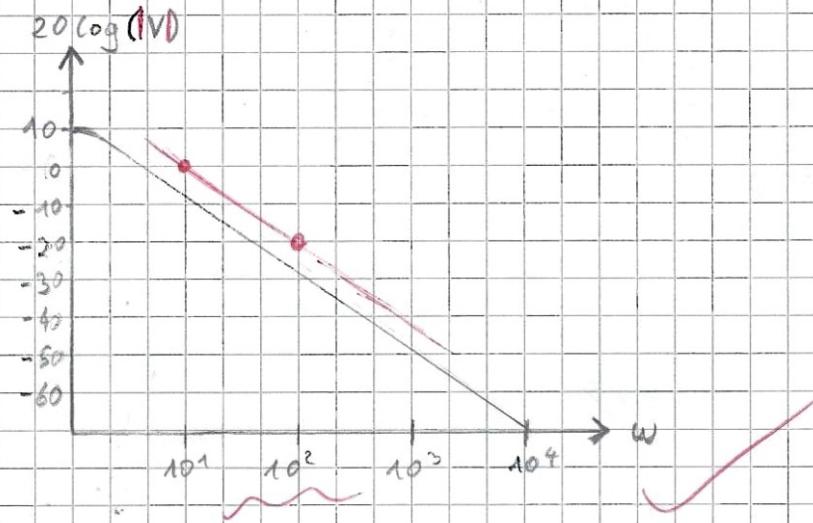
© Herlitz

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

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

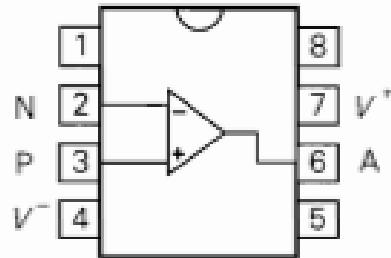
$$V = \frac{R_N}{R_D} \cdot \frac{1}{\omega R_C}$$

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. [3]

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 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.

**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> [4]
OPV	$\mu\text{A}741$

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 charaktersisiert, 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

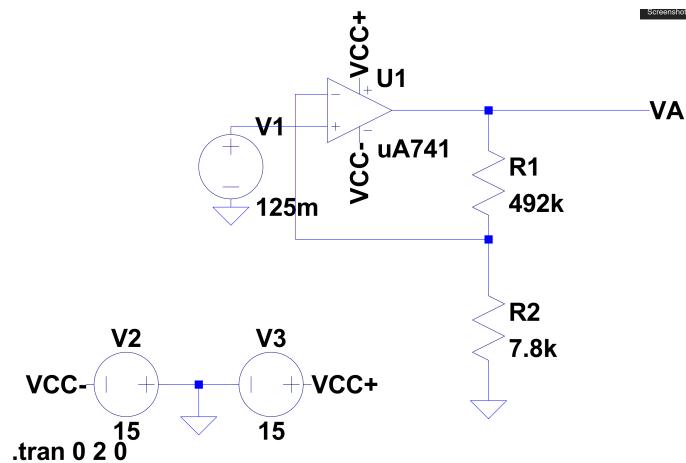
Für den praktischen Teil an der Steckplatine wurden Widerstände der E12-Reihe, mit denen die in der Vorbereitung angegebenen respektive errechneten Werte angenähert wurden, verwendet.

Die verwendeten Geräte sind Tabelle 1 zu entnehmen.

### 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  $\mu\text{A}741$ .



**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  $VA$  über die Eingangsspannung  $V1$  aufgetragen. Die SPICE-Directive der Simulation ist  $.dc V1 -0.3 0.3 0.01$

#### 4.1.2 Steckbrett

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

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

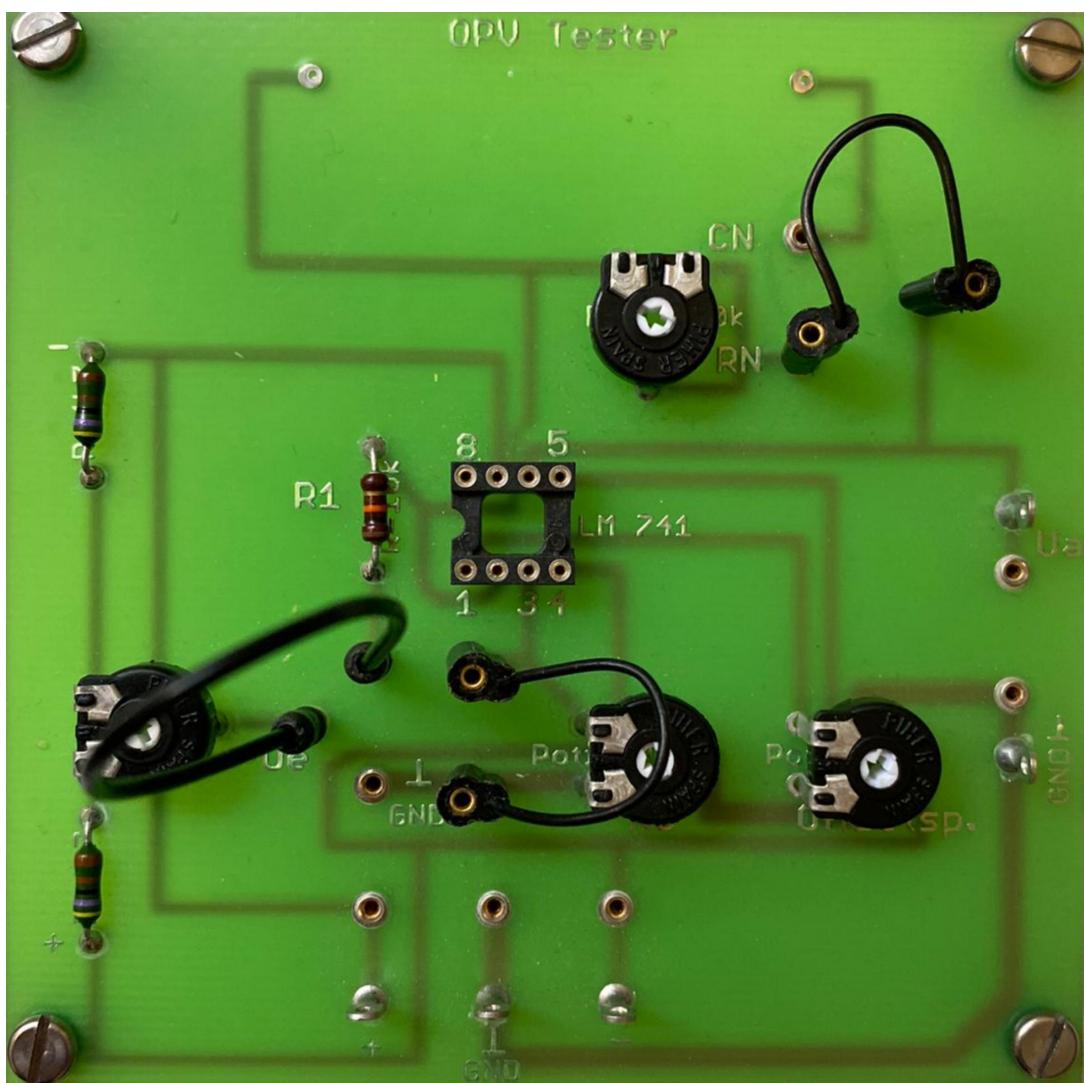
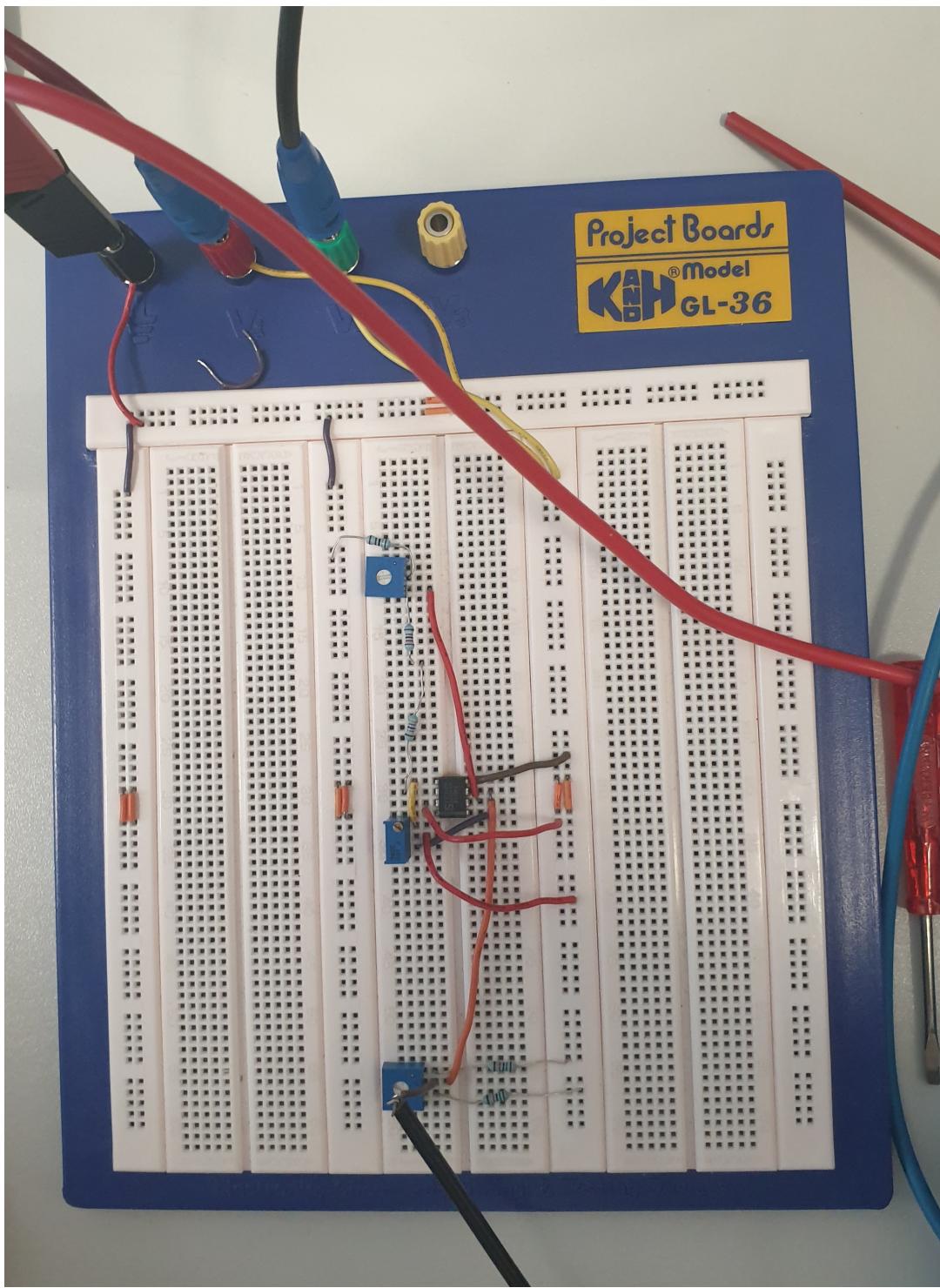


Abbildung 4: Die vorhandene Testschaltung als invertierender Verstärker.

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 Potentiometers (und somit Variieren der Eingangsspannung) und dem Messen der Ausgangsspannung erfolgreich überprüft.

**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 k $\Omega$  und ein 14,96 k $\Omega$  mit einem 1 k $\Omega$  Poti verwendet um eine wie in der 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  $V1$  zu erzeugen, welche 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 k $\Omega$  und 7,8 k $\Omega$  durch folgende E12-Reihe Widerstände 470 k $\Omega$  mit 22 k $\Omega$  und 6,8 k $\Omega$  mit einem 1 k $\Omega$  Poti ersetzt. Das Potentiometer wurde verwendet um die Ungenauigkeiten der E12 Widerstände beim Verstärkungsfaktor ausbessern zu können.



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

**Offsetabgleich** Um den Offsetspannungableich durchführen zu können, ist zuerst mal 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 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 bekommen hat, welcher durch leichtes drehen des Anschlusses repariert werden konnte. Nun konnte die  $U_a$  und  $U_e$  des Elektrometerverstärker gemessen werden. Dies wurde mittels zwei Multimeter [4] 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 nützlich.

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

**Untersuchung des Aussteuerungsbereichs** Um den Aussteuerungsbereich untersuchen zu können wurde der Eingangsspannungsteiler so dimensioniert, dass dieser an die Grenzen der Verstärkung des OPVs bis zu der Betriebsspannung treiben kann. Da die Eingangsspannung von  $-500 \text{ mV}$  bis  $500 \text{ mV}$  liegen kann und der Verstärkungsfaktor circa 64 beträgt ist es leicht 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[5] dienen. Diese Messungen wurden unter Verwendung zweier Multimeter[4], in der Abbildung 2 ersichtlichen Schaltung, gemacht.

$V_a$  ... Ausgangsspannung

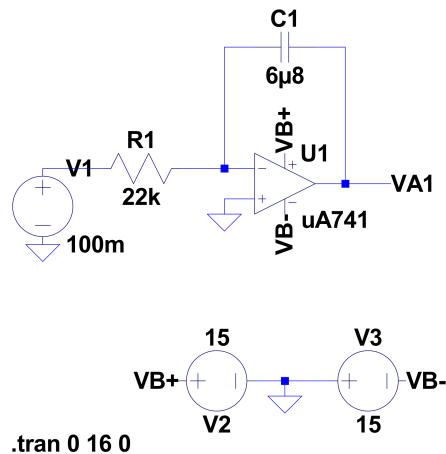
$V1$  ... Eingangsspannung

$V1$ / 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

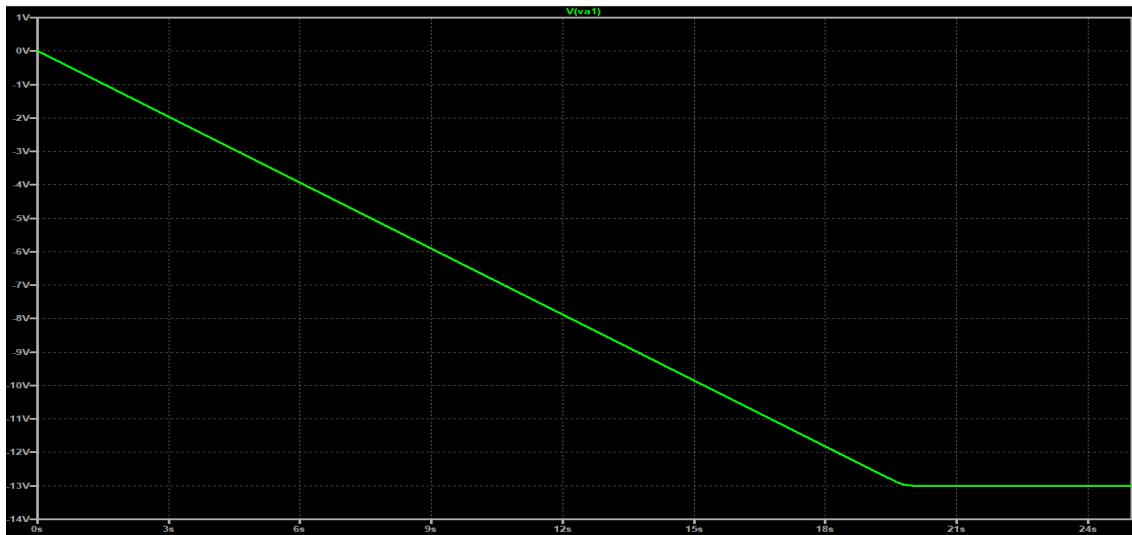
### 4.2.1 Simulation

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



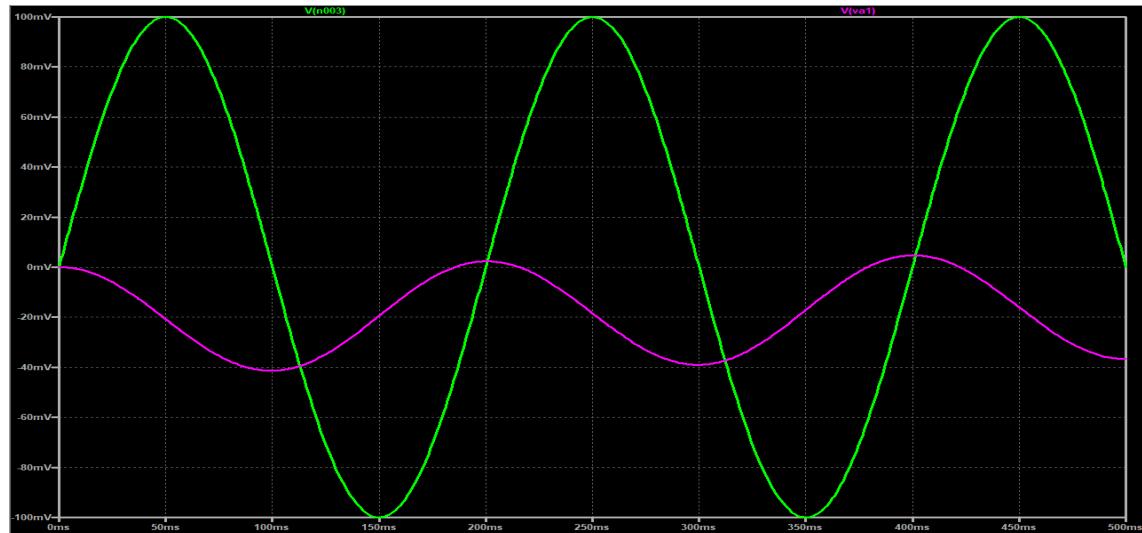
**Abbildung 6:** Dies ist die Integratorschaltung aufgebaut in *LTSPICE*

**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.



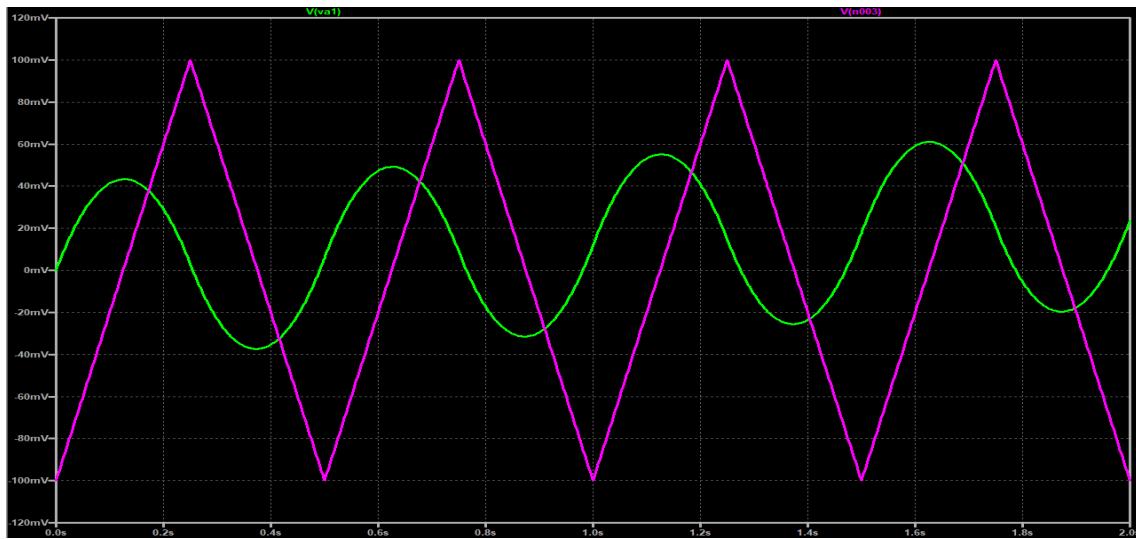
**Abbildung 7:** Die Schaltung aus Abbildung 6 wurde auf die Integrationszeit untersucht in dem eine Transiente-Analyse vom Ladevorgang gemacht wurde. Die Simulation SPICE-Directive ist `.tran 0 25 0` bei einer Eingangsspannung  $V_1$  von  $100$  mV.

**Simulation Verschiedene Eingangssignale** Zudem wurde das Verhalten der Schaltung (Abbildung 6) bei verschiedenen Eingangssignalen simuliert.

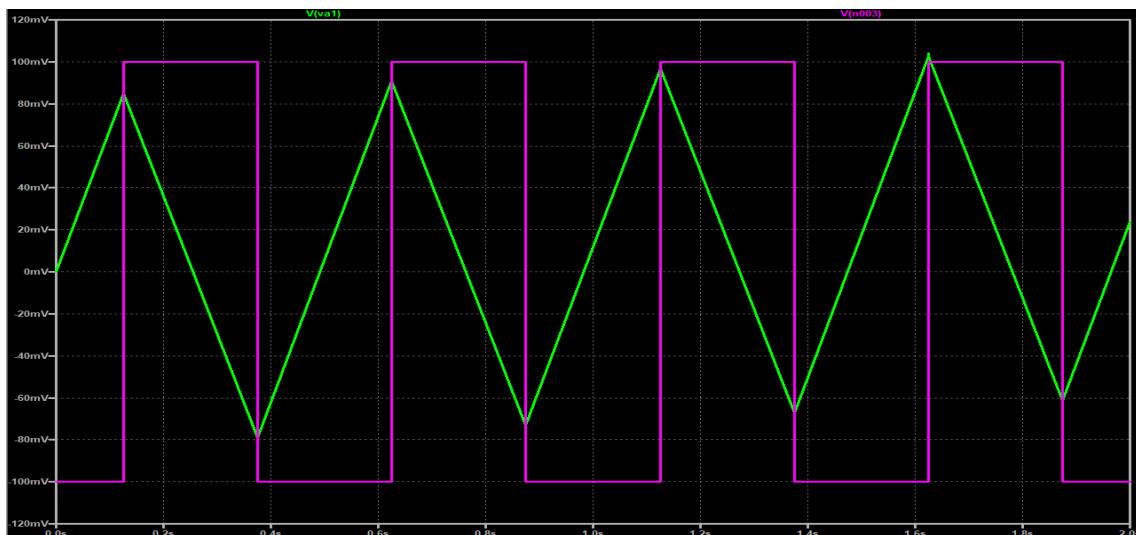


**Abbildung 8:** Die Simulation eines Sinuseingangssignal(Grün)  $V_1$  und dessen, durch die Schaltung (Abbildung 6) minus integrierten, Ausgangssignal  $V_{A1}$  (Pink) bei einer Frequenz von 5 Hz. Die Einstellungen können dem Oszilloskopogramm direkt entnommen werden.

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

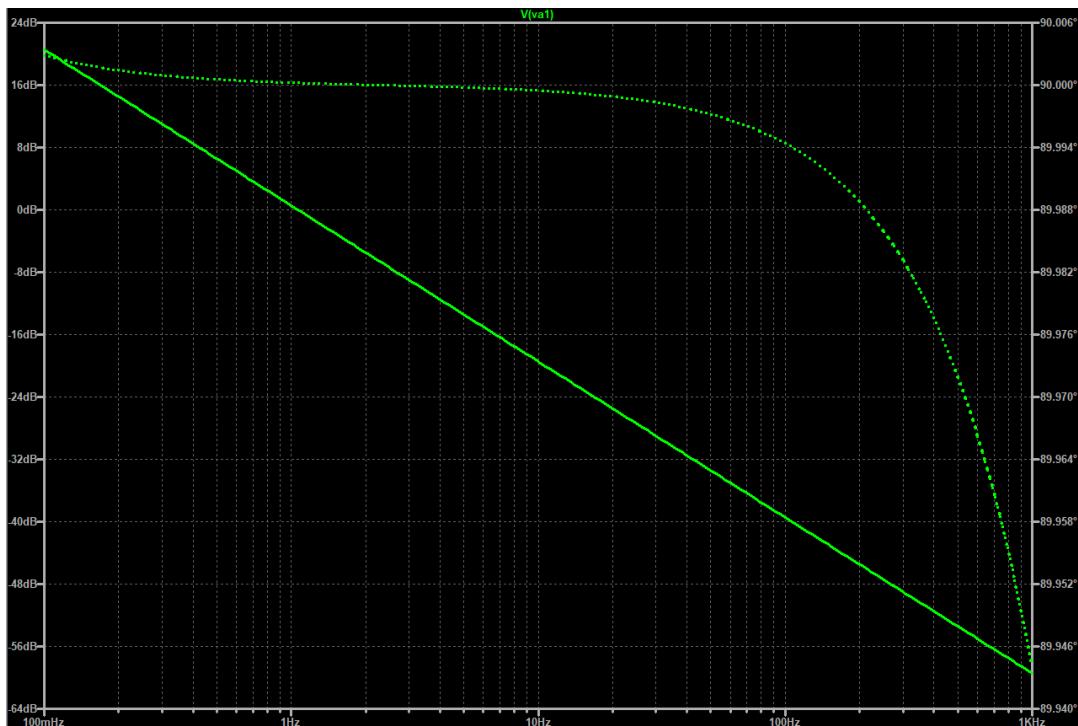


**Abbildung 9:** Die Simulation eines Dreickseingangssignal(Pink)  $V1$  und dessen, durch die Schaltung (Abbildung 6) minus integrierten, Ausgangssignal  $VA1$  (Grün) bei einer Frequenz von 2 Hz. Die Einstellungen können dem Oszilloskopogramm direkt entnommen werden.



**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 Oszilloskopogramm 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 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 gleich die Offsetabgleich nochmals überprüft. Jedoch musste dieser nicht angepasst werden, da noch immer alles kalibriert war.

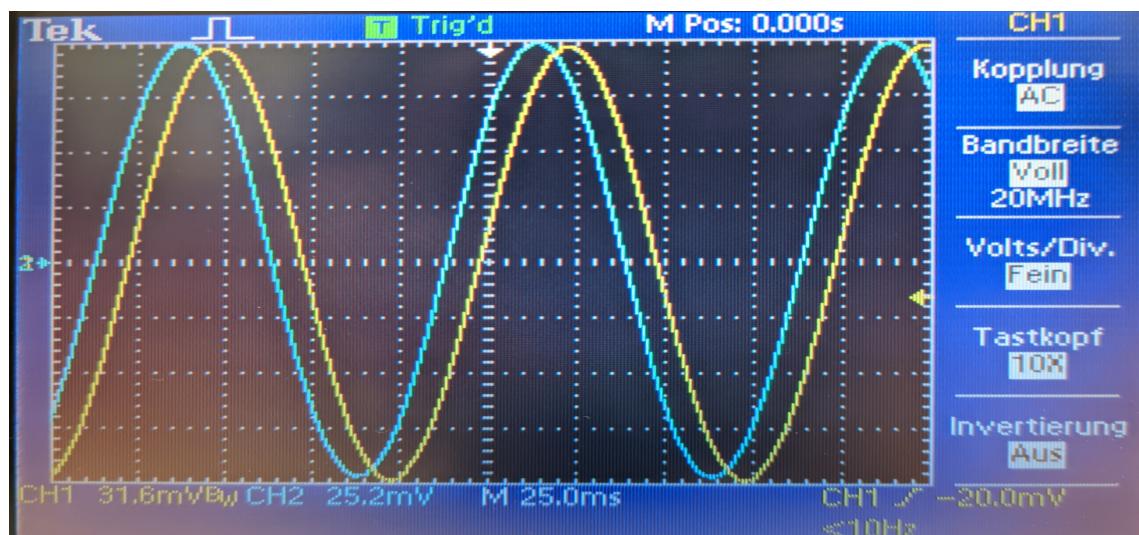
**Integrationszeit** Nun wurde die charakteristische Integrationszeit der Schaltung bestimmt. Indem zuerst der Kondensator, bis das Multimeter am Ausgang 0 mV anzeigte, entladen wurde und danach die Zeit des Ladens, die die Schaltung brauchte um die geforderte Spannung von  $-10 \text{ V}$  am Ausgang zu haben, gemessen.

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 bis am Ausgang  $-10\text{ V}$  anliegt. Bei einem Ladespannung  $91,8\text{ mV}$ , einem Widerstand von  $21,9\text{ k}\Omega$  und einer Kapazität von  $6,8\text{ }\mu\text{F}$

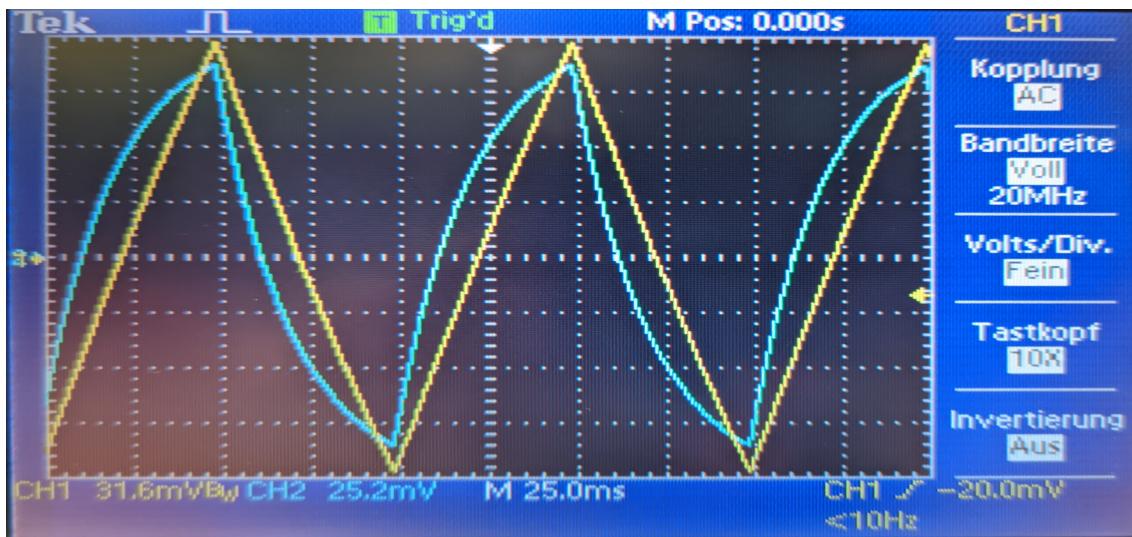
$T / \text{s}$
17,20
16,42
16,90
16,89
17,32
17,21

**Untersuchung Verschiedene Eingangssignale** Nun wurde die Integrationsfähigkeit der Schaltung durch Einspeisen verschiedener Eingangssignal qualitative 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  $10\text{ Hz}$ . Die Einstellungen können dem Oszillogramm direkt entnommen werden.

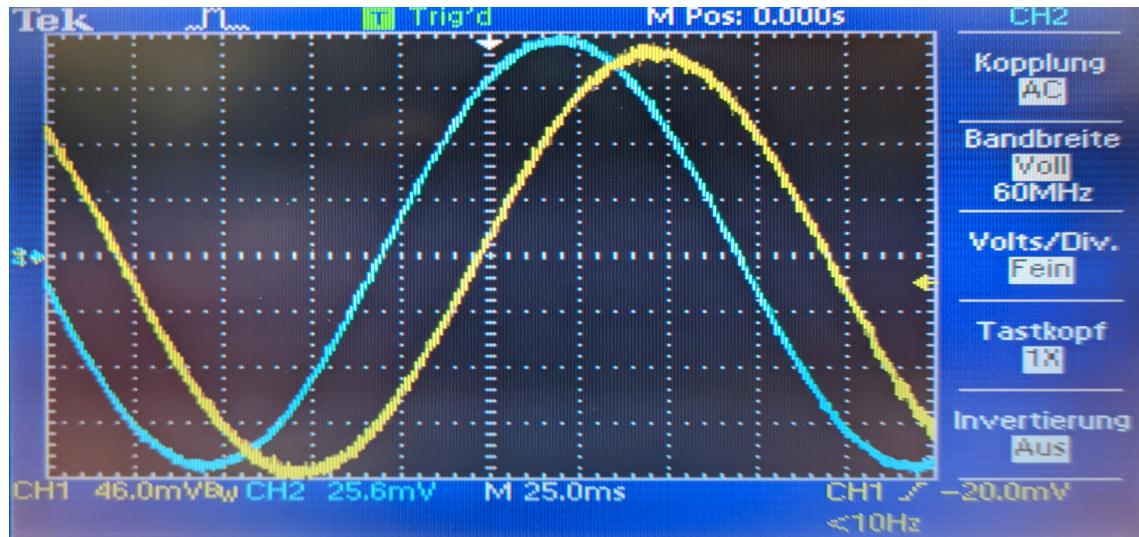
Nun wurde dasselbe mit einem Dreickseingangssignal , siehe Abbildung 13, gemacht.



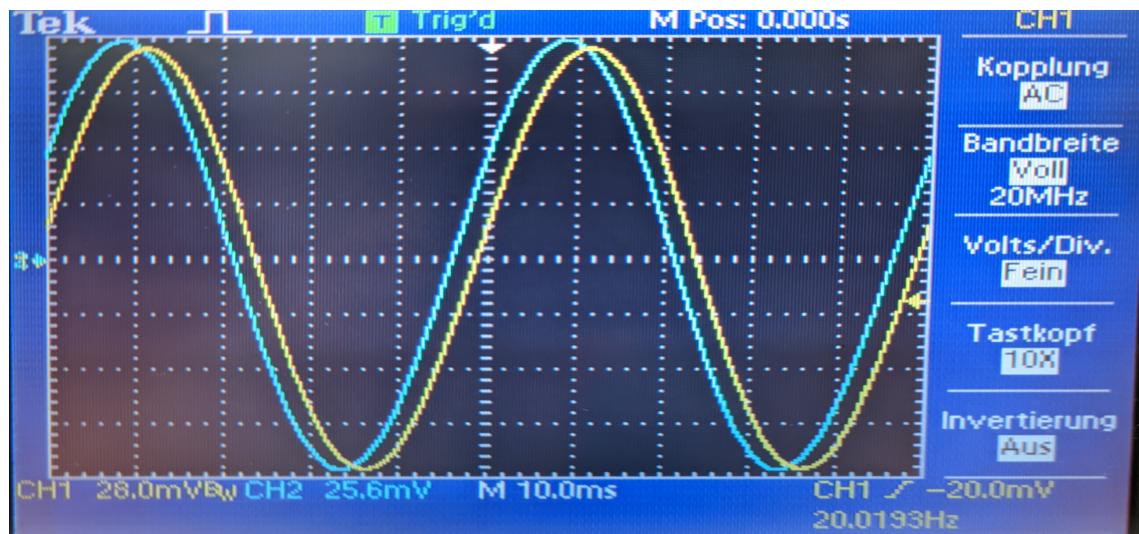
**Abbildung 13:** Die Aufnahme vom Dreickseingangssignal(Gelb) und dem minus integrierten Ausgangssignal (Blau) bei einer Frequenz von 10 Hz. Die Einstellungen können dem Oszillogramm direkt entnommen werden.

Da der Singalgenerator [2] keine Rechteckspannung erzeugen konnte, konnte dies auch nicht mit einem Rechteckssignal untersucht werden.

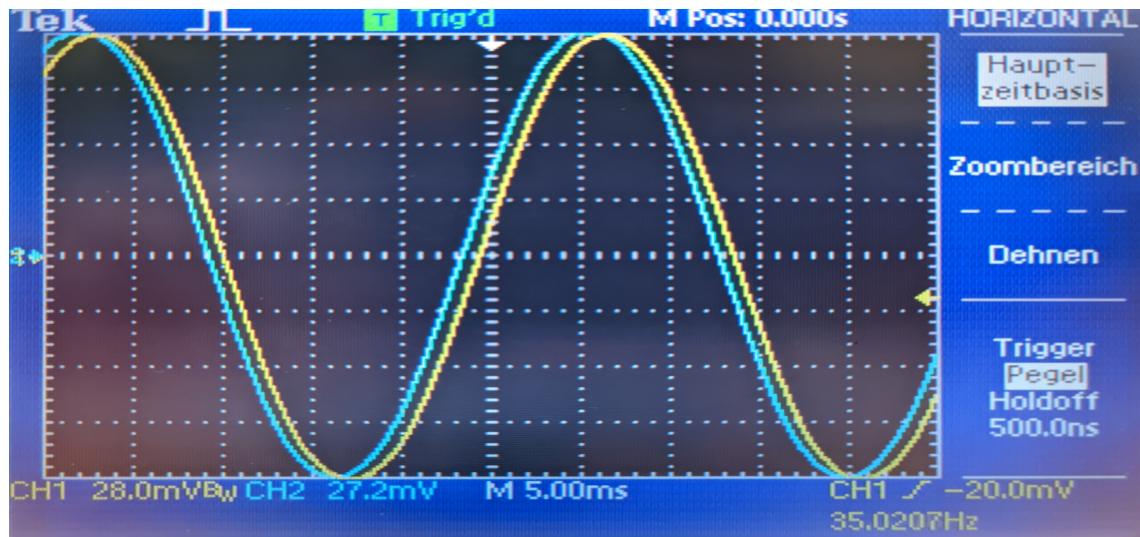
**Untersuchung der frequenzabhängigen Verstärkung** Zur Untersuchung der Frequenzabhängigkeit der Verstärkung des OPVs wurde wie im Kapitel Aufgabenstellung ersichtlich die Frequenz des Sinuseingangssignals von 5 Hz bis 50 Hz in 15er Schritten variiert.



**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.



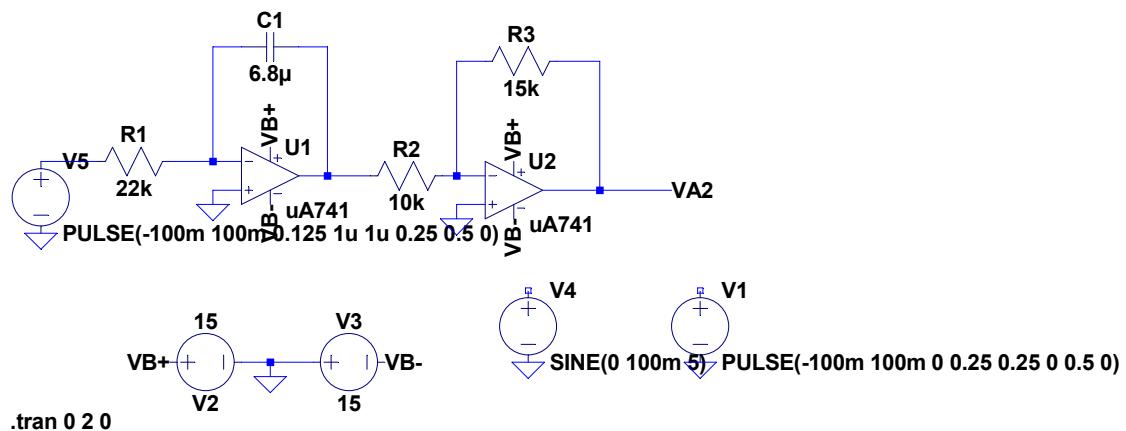
**Abbildung 16:** In dieser Grafik ist das Sinuseingangssignal(Gelb) bei einer Frequenz von 35 Hz und dessen Ausgangssignal(Blau) ersichtlich.



**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  $\mu$ A741 als Operationsverstärker in der Verstärkerstufe verwendet wurde.



--- C:\Users\ELEKTR~1\AppData\Local\Temp\Draft3.asc ---

**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 zeitliche Transienten-Analyse ermittelt, wobei eine konstante Spannungsquelle von 100 mV verwendet wurde. Die Ausgangsspannung in Abhängigkeit der Zeit ist in Abbildung 19 dargestellt.



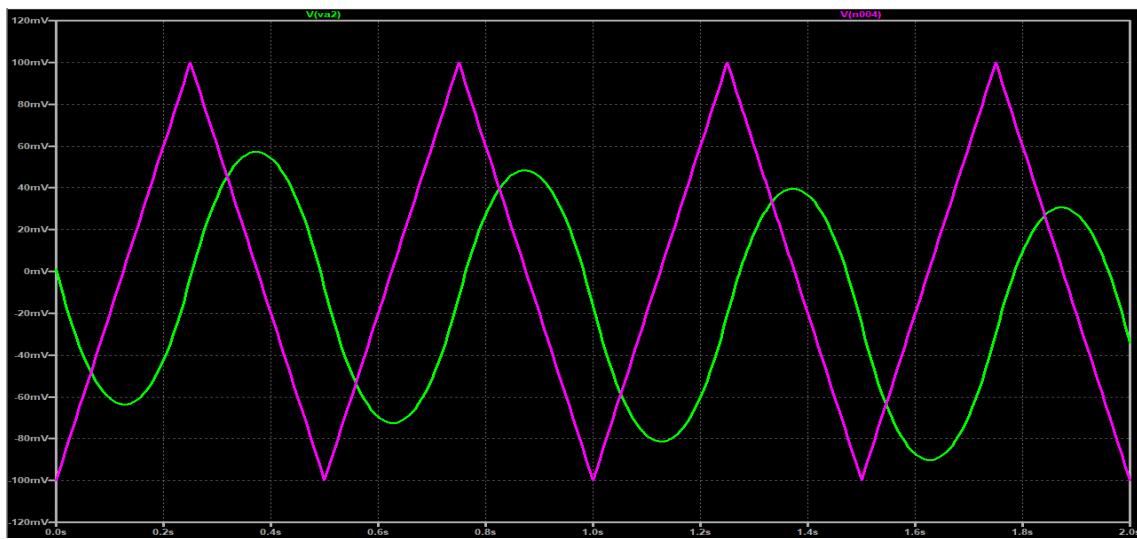
**Abbildung 19:** Die Schaltung aus Abbildung 6 wurde auf die Integrationszeit untersucht, indem eine Transienten-Analyse vom Ladevorgang gemacht wurde. Die Simulation SPICE-Directive ist `.tran 0 16 0` bei einer Eingangsspannung  $U_e$  von 100 mV.

**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 V 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.

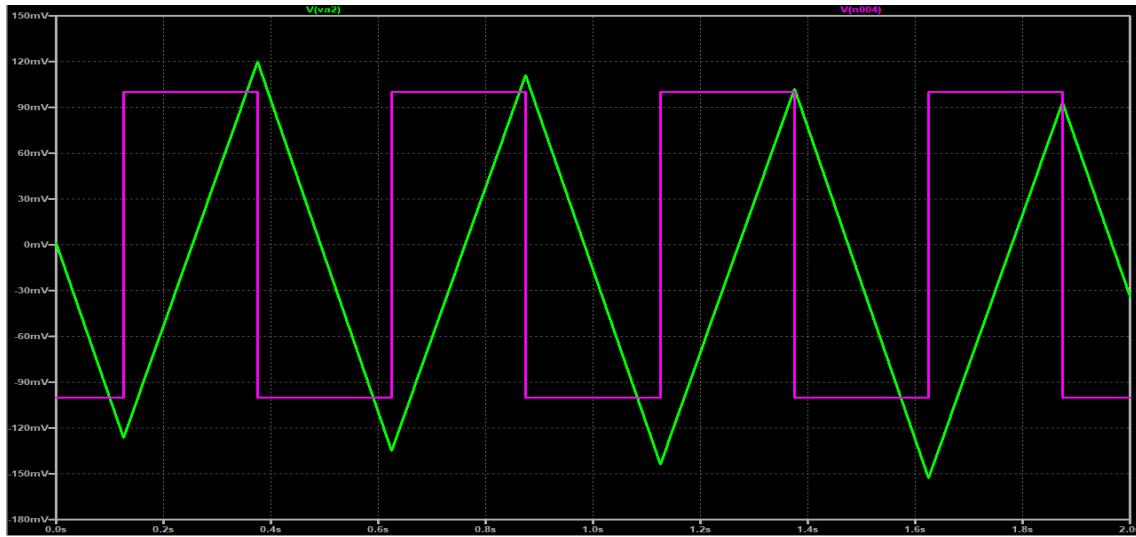


**Abbildung 20:** Die Simulation eines Sinuseingangssignal (Pink) und dessen, durch die Schaltung (Abbildung 18) integrierten, Ausgangssignal  $V_{A2}$  (Grün) bei einer Frequenz von 5 Hz. Die Einstellungen können dem Oszillosrogramm direkt entnommen werden.

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.

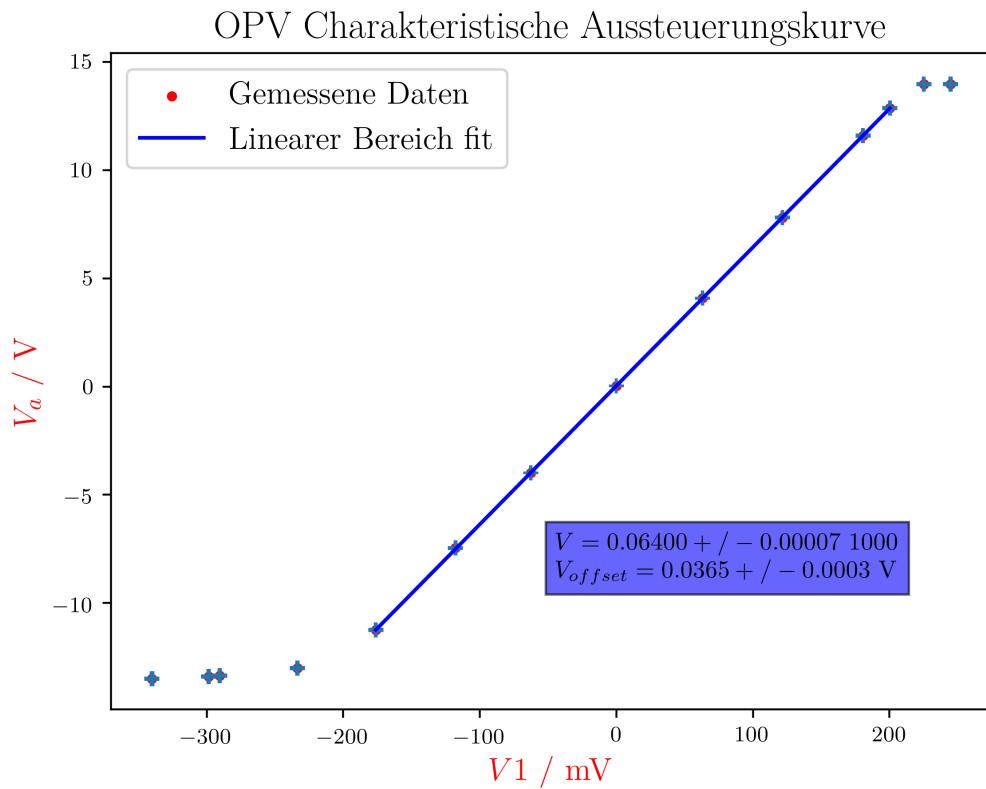
## 5 Auswertung

### 5.1 Elektrometerschaltung

#### 5.1.1 Simulation

#### 5.1.2 Steckbrett

**Verstärkung & Aussteuerungsbereich** Damit die Verstärkung in 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  $\mu\text{A741}$  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  $V_{\text{offset}}$  dennoch vorhanden war ist dieser im Fit berücksichtigt worden.

Die Berechnung und grafische Darstellung wurde mit dem selbstgeschriebenen Open-Source-Python-Package `labtool-ex2[labtool]` 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** heraus lesen aus der grafik

### 5.2.2 Steckbrett

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

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

# 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.

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  $\pm 220 \text{ V}$  auf, wobei die maximale Ausgangsspannung auf der positiven Achse ca.  $13,9 \text{ V}$  und auf der negativen  $-13,5 \text{ V}$  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.

**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 15,1 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 sechsmaliger Durchführung ein Wert von  $(17,0 \pm 0,4)$  s.

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

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 10,1 s aus Abbildung 19 bestimmt. Abgesehen von der erneut nur marginalen Abweichung von 0,1 s, die wohl auf die Näherungen der Widerstände zurückzuführen ist, 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 Oszillosrogramm für den Umkehrintegrator am Steckbrett zu sehen.

### Frequenzabhängigkeit

## 6.2 Zusammenfassung

## Literaturverzeichnis

- [1] *Digital Storage Oscilloscopes. TDS1000 Series • TDS2000 Series.* en. Fluke Corporation. 2005. URL: [https://download.tek.com/datasheet/3GW\\_15314\\_6.pdf](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](https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/D100/HT_FG250D_MANUAL_DE.pdf) (besucht am 11.05.2022).
- [3] 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](https://www.ebo-ok.de/de/product/37063433/ulrich_tietze_christoph_schenk_eberhard_gamm_halbleiter_schaltungstechnik.html).
- [4] *Users Manual. 175, 177, 179 True-rms Multimeters.* en. Fluke Corporation. 2003. URL: [https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/175\\_\\_\\_\\_\\_umeng0200.pdf](https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/175_____umeng0200.pdf) (besucht am 24.04.2022).
- [5] *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. [3]	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	14
4	Die vorhandene Testschaltung als invertierender Verstärker.	15
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 .tran 0 25 0 bei einer Eingangsspannung <i>V1</i> von 100 mV.	20

8	Die Simulation eines Sinuseingangssignal(Grün) $V_1$ und dessen, durch die Schaltung (Abbildung 6) minus integrierten, Ausgangssignal $V_{A1}$ (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 $V_{A1}$ (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 $V_{A1}$ (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 SPICE-Directive simuliert .ac oct 100 0.1 1k . . . . .	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 $V_{A2}$ (Grün) bei einer Frequenz von 5 Hz. Die Einstellungen können dem Oszilloskopogramm direkt entnommen werden. . . . .	30

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 Oszillogramm direkt entnommen werden. . . . .	30
22	Die Simulation eines Rechteckseingangssignal (Pink) und dessen, durch die Schaltung (Abbildung 18) integrierten, Ausgangssignal $V_A2$ (Grün) bei einer Frequenz von 2 Hz. Die Einstellungen können dem Oszillogramm direkt entnommen werden. . . . .	31
23	Diese Grafik zeigt den gemessenen Aussteuerungsbereich des $\mu$ 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[5] dienen. Diese Messungen wurden unter Verwendung zweier Multimeter[4], in der Abbildung 2 ersichtlichen Schaltung, gemacht. $V_a$ . . . Ausgangsspannung $V_1$ . . . Eingangsspannung . . . . .	19
3	Messungen der Integrationszeit der realen Integratorschaltung aus Abbildung 6, wobei $T$ die Ladezeit bis am Ausgang $-10\text{ V}$ anliegt. Bei einem Ladespannung $91,8\text{ mV}$ , einem Widerstand von $21,9\text{ k}\Omega$ und einer Kapazität von $6,8\text{ }\mu\text{F}$ . . . . .	24