

V51: Der Operationsverstärker

Simon Schulte
simon.schulte@udo.edu

Tim Sedlaczek
tim.sedlaczek@udo.edu

Durchführung: 11.07.2018

Abgabe: 14.09.2018

TU Dortmund – Fakultät Physik

1 Theorie

In diesem Versuch werden verschiedene Schaltungen mit Hilfe des Operationsverstärkers realisiert. Zunächst wird auf die physikalischen Eigenschaften eingegangen, woraufhin verschiedene Schaltungen skizziert und schließlich realisiert werden.

1.1 Eigenschaften des Operationsverstärkers

Die wichtigste elektrische Eigenschaft des Operationsverstärkers, auch Differenzverstärker ist die Proportionalität der Ausgangsspannung U_A zur Differenz der Eingangsspannungen U_P und U_N :

$$U_A = V(U_P - U_N), \quad (1)$$

wobei V die Leerlaufverstärkung bezeichnet. Diese Beziehung gilt in einem Spannungsbereich $-U_B < U_A < U_B$, der durch die Betriebsspannung U_B bestimmt ist. Außerhalb dieses Bereichs läuft die Ausgangsspannung in eine Sättigung.

Aus dem Zusammenhang für U_A ergibt sich, dass für eine positive Spannung bei U_N und $U_P < U_N$ die Ausgangsspannung negativ wird. Daher nennt man den negativen Eingang auch den invertierenden Eingang und den positiven Eingang auch den nicht invertierenden Eingang. Die Grundsaltung eines Operationsverstärkers ist in Abbildung 1 dargestellt.

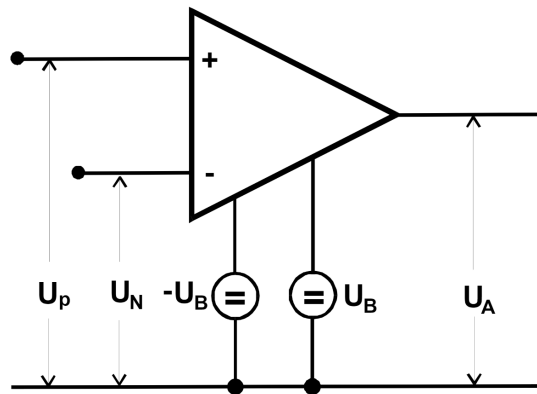


Abbildung 1: Schaltbild eines Operationsverstärkers mit Ausgangsspannung U_A und Eingangsspannungen U_P und U_N [TuD18].

Neben der meist frequenzabhängigen Leerlaufverstärkung V besitzt der Operationsverstärker weitere Kenngrößen, wie die Eingangswiderstände, $r_{e,P}$ und $r_{e,N}$, sowie einen Ausgangswiderstand r_a . Um Rechnungen zu Vereinfachen gilt für einen idealen Operationsverstärker

$$V = \infty, \quad r_e = \infty, \quad r_a = 0. \quad (2)$$

Aufgrund dieser Annahmen eines idealen Operationsverstärkers lassen sich die Schaltungen mit einem Operationsverstärker relativ einfach nach Knoten- und Maschenregel berechnen. Dabei spielt nur die äußere Beschaltung des OPVs eine Rolle.

Im Gegensatz dazu müssen zur theoretischen Beschreibung eines realen Operationsverstärkers zusätzliche Kenngrößen in Betracht gezogen werden. Die Gleichtaktverstärkung

$$V_{\text{Gl}} = \frac{\Delta U_{\text{A}}}{\Delta U_{\text{Gl}}} \quad (3)$$

berücksichtigt geringe Asymmetrien der beiden Verstärkungskanäle. Dabei bezeichnen ΔU_{A} die Differenz der Ausgangsspannung zu 0 und ΔU_{Gl} den Unterschied der eigentlich gleichen Eingangsspannungen. Die auf Grund endlicher Eingangswiderstände r_{e} auftretenden Eingangsströme werden mit I_{P} und I_{N} , deren Mittelwert,

$$I_{\text{B}} = \frac{1}{2} (I_{\text{P}} + I_{\text{N}}) , \quad (4)$$

als Eingangsruhestrom und die Differenz

$$I_{\text{O}} = I_{\text{P}} - I_{\text{N}} , \quad (5)$$

als Offsetstrom bezeichnet. Ähnlich zum Offsetstrom, verschwindet auch die Spannung häufig nicht. Für die Offsetspannung U_{O} gilt daher bei $U_{\text{A}} = 0$

$$U_{\text{O}} = U_{\text{P}} - U_{\text{N}} . \quad (6)$$

Sie ist abhängig von Temperatur, Zeit und Betriebsspannungen. Die totale Ableitung wird mit Offsetspannungsdrift bezeichnet.

2 Schaltungsbeispiele

Im Folgenden werden einige Schaltbeispiele für Operationsverstärker dargestellt.

2.1 Rückgekoppelter Linearverstärker

Der relativ kleine Arbeitsbereich des Operationsverstärkers ist in der Anwendung oft nicht praktikabel. Um diesen Bereich zu verbreitern, wird die Verstärkung reduziert, indem ein Teil der Ausgangsspannung auf den invertierenden Eingang gegeben wird. (Gegenkopplung). Der Anteil der zurückgeführten Spannung kann dabei mit Hilfe der Widerstände R_1 und R_{N} bestimmt werden, die in Abbildung 2 dargestellt sind.

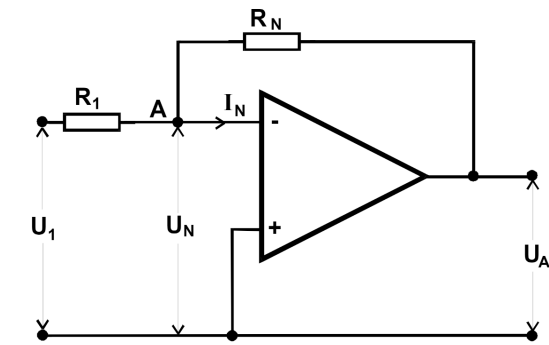


Abbildung 2: Gegengekoppelter Linearverstärker [TuD18].

U_N ist aufgrund der hohen Leerlaufverstärkung V nahezu Null. Bei Betrachtung des idealen Operationsverstärkers wird U_N sogar exakt Null, da dort $V \rightarrow \infty$. Beim idealen Operationsverstärker verschwindet außerdem der Eingangsstrom I_N . Daraus folgt mit der Kirchhoffschen Knotenregel für den Verzweigungspunkt A:

$$\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_A}{R_N} = 0. \quad (7)$$

Die Verstärkung V' ist das Verhältnis von Ausgangsspannung U_A zur Eingangsspannung U_1 . Daraus ergibt sich

$$V' = -\frac{R_N}{R_1}. \quad (8)$$

Für den Fall $R_N/R_1 \ll V$ gilt dies auch für den realen OPV. Der Geringe Eingangswiderstand $r_e \approx R_1$ wirkt sich bei hochohmigen Spannungsquellen möglicherweise nachteilig auf Spannungsmessungen aus. Im nächsten Abschnitt wird daher ein Linearverstärker vorgestellt, der diesen Nachteil umgeht.

2.2 Umkehr-Integrator und -Differentiator

Mit Hilfe eines zusätzlichen Kondensators mit Kapazität C in der Schaltung eines Linearverstärkers lässt sich entweder ein Integrations- oder eine Differentiationsglied bauen. Für die Ausgangsspannungen $U_{A,I}$ des Integrators und $U_{A,D}$ des Differentiators gilt dann

$$U_{A,I} = -\frac{1}{RC} \int U_1(t) dt,$$

und $U_{A,D} = -RC \frac{dU_1}{dt}.$

Dabei bezeichnet R den Widerstand. Integrator und Differentiator besitzen also Tief- und Hochpass Eigenschaften und unterscheiden sich nur durch die Positionen des Widerstandes und des Kondensators. Die entsprechenden Schaltungen sind in Abbildung 3 dargestellt.

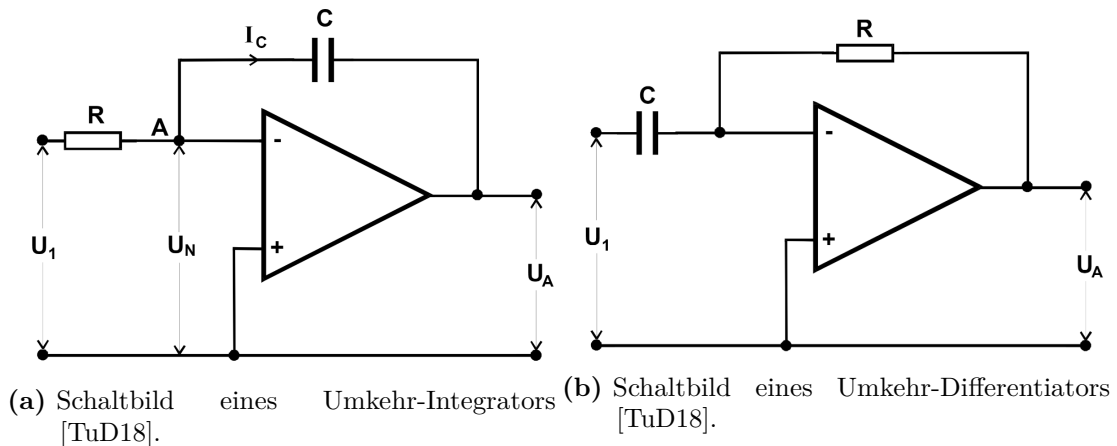


Abbildung 3: Linearverstärker mit Kondensator.

2.3 Schmitt-Trigger

Der Operationsverstärker kann als Schalter genutzt werden. Statt, wie bisher einen Teil der Ausgangsspannung auf invertierenden Eingang zu geben (Gegenkopplung), wird dieser Anteil auf den nicht-invertierenden Eingang gegeben (Mitkopplung). Damit wird das eigene Ausgangssignal verstärkt und der Operationsverstärker erreicht schnell die Sättigungsspannung U_B .

$$U_A = \begin{cases} +U_B & : U_1 > \frac{R_1}{R_P} U_B \\ -U_B & : U_1 < -\frac{R_1}{R_P} U_B \end{cases}, \quad (9)$$

mit der Betriebsspannung U_B . Der Schmitt-Trigger besitzt also im Gegensatz zu anderen Schaltern nicht nur eine Schaltschwelle, sondern zwei. Mit dieser Eigenschaft eignet sich der Schmitt-Trigger besonders gut zur bereinigung von digitalen Signalen. Die entsprechende Schaltung ist in Abbildung 4 dargestellt.

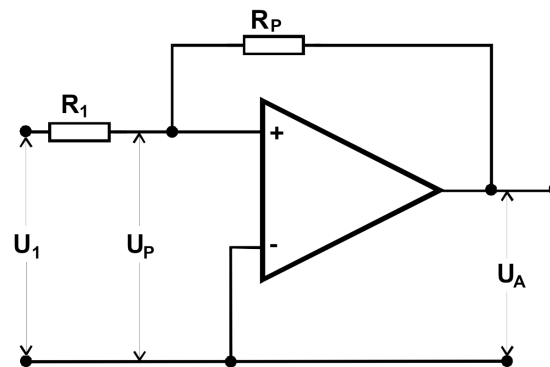


Abbildung 4: Schaltbild eines Operationsverstärkers, der als Schmitt-Trigger genutzt wird.

2.4 Signalgenerator

Schließlich können mit Hilfe eines Operationsverstärkers verschiedene Signalspannungen erzeugt werden. Dazu wird jeweils eine Mehrzahl von OPVs miteinander verschaltet.

2.4.1 Erzeugung von Sinusschwingungen

Durch Kombination zweier Integratoren mit einem Umkehrverstärker lassen sich gedämpfte Sinusschwingungen erzeugen. Die Schaltung kann durch eine Differentialgleichung 2. Ordnung beschrieben werden und liefert die Lösung

$$U_A(t) = U_0 \exp\left(\frac{\eta t}{20RC}\right) \sin\left(\frac{t}{RC}\right). \quad (10)$$

Dabei ist $-1 < \eta < 1$ durch das Potentiometer P einzustellen. Die Schwingungsdauer beträgt dabei $T = 2\pi RC$, die Abklingzeit $\tau = 20RC/|\eta|$. Damit sollte die Amplitude für $\eta = 0$ konstant bleiben. Das Schaltbild zu einem Sinusgenerator ist in Abbildung 5 dargestellt.

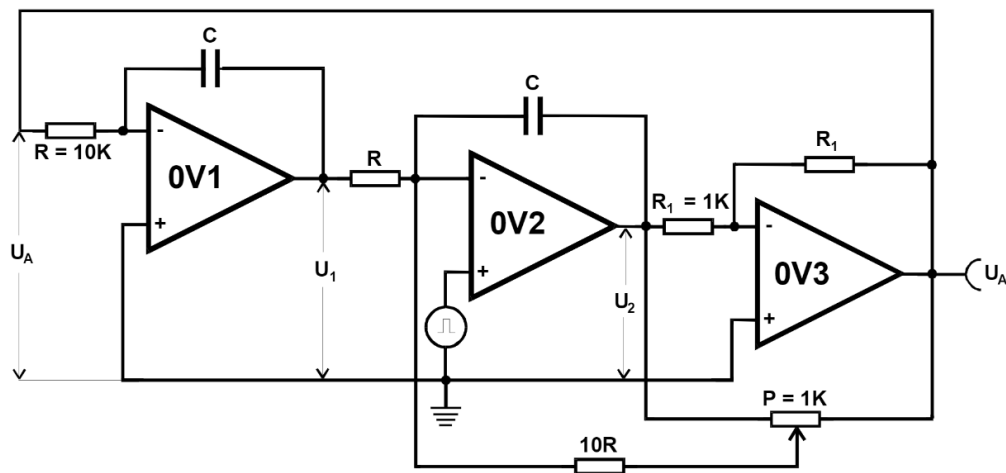


Abbildung 5: Schaltbild eines Sinusgenerators. Es werden zwei Integrationsglieder und ein Umkehrverstärker verbaut [TuD18].

3 Durchführung

Mit Hilfe der Schaltung 2 wird zunächst der Frequenzgang eines gegengekoppelten Verstärkers bei vier verschiedenen Verstärkungsgraden V' und über mehrere Zehnerpotenzen untersucht.

Als nächstes wird ein Umkehr-Integrator, wie in Abbildung 3a zur Überprüfung der Beziehung $U_a \approx \frac{1}{V}$ aufgebaut. Außerdem werden verschiedene Signalformen eines Funktionsgenerators auf den Integrator gegeben und die Ausgangssignale an einem Oszilloskop beobachtet.

Daraufhin wird ein Umkehr-Differentiator nach der Schaltung in Abbildung 3b verwendet und wie beim Umkehr-Integrator verfahren.

Danach wird ein Schmitt-Trigger wie in Abbildung 4 aufgebaut. Auf den Eingang wird ein Sinus-Signal gegeben. Das Ausgangssignal wird erneut an einem Oszilloskop beobachtet und die Spannungsschwelle vermessen.

Als Letztes werden gedämpfte Schwingungen untersucht. Zur Realisierung einer gedämpften Schwingung wird die Schaltung nach Abbildung 5 verwendet. Zur Erzeugung der Schwingung wird vor dem OPV 2 ein Rechteckgenerator mit eingebaut. An einem Potentiometer wird dann $\eta = -1$ für eine gedämpfte Schwingung eingestellt.

4 Auswertung

4.1 Fehlerrechnung

Für die Fehlerrechnung sowie den mathematischen Teil der Auswertung wird auf PYTHON zurückgegriffen:

Regressionen sowie deren Fehler wurden durch die SCIPY [JOP+] Funktion CURVE-FIT durchgeführt. Grafiken wurden mit MATPLOTLIB [Hun07] erstellt. Fehlerfortpflanzung wird durch die Bibliothek UNCERTAINTIES [Leb] automatisiert.

4.2 Gegengekoppelter Linearverstärker

Bei dem gegengekoppelten Linearverstärker werden die Werte aus Tabelle 4 gemessen. Die Graphen dazu sind in den Abbildungen 6 bis 9 zu sehen. Als Eingangsspannung dienten dabei die Spannungen in Tabelle 1.

Tabelle 1: Die Eingangsspannungen, Widerstandsverhältnisse, Verstärkungsfaktoren, und $\log \frac{V'}{\sqrt{2}}$.

Schaltung	U_e	$\frac{R_N}{R_1}$	V'	$\log \frac{V'}{\sqrt{2}}$
1	260 mV	$469 \Omega / 468 \Omega \approx 1$	0,998	-0,348
2	258 mV	$996 \Omega / 468 \Omega \approx 2$	0,990	-0,356
3	257,5 mV	$10 \text{ k}\Omega / 468 \Omega \approx 21$	0,992	-0,354
4	257,5 mV	$33,1 \text{ k}\Omega / 468 \Omega \approx 71$	0,951	-0,396

Die Messwerte werden durch die jeweilige Eingangsspannung geteilt, um auf den effektiven Verstärkungsfaktor V'_{eff} zu kommen. Der jeweils erste Wert stellt den Verstärkungsfaktor V' dar und der entsprechende Wert steht zusammen mit dem Wert $\log \frac{V'}{\sqrt{2}}$ und dem Widerstandsverhältnis in Tabelle 1. Die Frequenzen und die effektiven Verstärkungsfaktoren werden logarithmiert und stehen in Tabelle 5. $\log \frac{V'}{\sqrt{2}}$ wird als Konstante in die Plots eingezeichnet. Die Bandbreite ist bis zu dem Schnittpunkt der beiden Kurven definiert. Also wird eine Gerade, der Form:

$$\log V'_{\text{eff}}(\log \nu) = m \cdot \log \nu + b,$$

durch die fallende Flanke der Messwerte gefittet und die Parameter in der entsprechenden Umkehrfunktion

$$\log \nu(\log V'_{\text{eff}}) = \frac{\log V'_{\text{eff}} - b}{m}$$

verwendet um durch Einsetzen von $\log \frac{V'}{\sqrt{2}}$ den Wert für $\log \nu'_g$ zu berechnen. Durch exponentieren folgt die Grenzfrequenz ν'_g . Für den Fit werden bei Schaltung 1 die letzten sechs Werte verwendet. Bei Schaltung 2 sind es die letzten acht. Bei Schaltung 3 alle außer die ersten sechs und bei Schaltung 4 alle außer die ersten zwei und die letzten vier.

Als Parameter ergeben sich für die vier Schaltungen die Werte in Tabelle 2. In selbiger stehen auch die Grenzfrequenzen und das Verstärkungs-Bandbreite-Produkt $\nu'_g \cdot V'$.

Tabelle 2: Die Parameter der Fits, Grenzfrequenzen und Verstärkung-Bandbreite-Produkte der Schaltungen.

Schaltung	m	b	ν'_g in kHz	$\nu'_g \cdot V'$ in kHz
1	$-0,550 \pm 0,015$	$3,51 \pm 0,11$	$(1,12 \pm 0,32) \cdot 10^3$	$(1,12 \pm 0,32) \cdot 10^3$
2	$-0,516 \pm 0,014$	$3,06 \pm 0,09$	$(7,6 \pm 1,9) \cdot 10^2$	$(7,5 \pm 1,9) \cdot 10^2$
3	$-0,704 \pm 0,014$	$2,98 \pm 0,07$	115 ± 16	114 ± 16
4	$-0,760 \pm 0,011$	$2,39 \pm 0,06$	$38,9 \pm 3,5$	$37,0 \pm 3,4$

Als stark vereinfachtes Ersatzschaltbild eignet sich hierbei ein RC -Tiefpass. Da die Eingangswiderstände des Operationsverstärkers sehr groß sind und einige der Bauteile im inneren des Verstärkers (z.B. Dioden und Transistoren) eine wenn auch kleine Sperrschichtkapazität besitzen zeigt sich bei entsprechend hohen Frequenzen ein kapazitives Verhalten.

Zur Abschätzung von V wird die Formel

$$\frac{1}{V'} \approx \frac{1}{V} + \frac{R_1}{R_N} \quad (11)$$

aus der Anleitung verwendet. Dazu wird diese auf V umgeformt und für die einzelnen Schaltungen V' sowie die Widerstände eingesetzt. Die Ergebnisse stehen in Tabelle 3.

Tabelle 3: Die Ergebnisse der Abschätzung von V .

Schaltung	V
1	≈ 246
2	≈ 2
3	≈ 1
4	≈ 1

Tabelle 4: Die gemessenen Spannungen für den gegengekoppelten Linearverstärker.

Schaltung: 1		2		3		4	
ν in kHz	U_A in mV	ν in kHz	U_A in mV	ν in kHz	U_A in mV	ν in kHz	U_A in mV
0,4	259,5	0,4	255,5	0,4	255,5	0,4	245
16,4	259,5	20	255,5	16,4	251,5	16,4	225
32,4	259,5	40	255,5	32,4	239	32,4	183
48,35	259,5	80	254,5	48,4	230	48,4	148,5
64,35	259,5	120	248	66,4	213	64	120,5
80,3	259,5	160	251	82,4	203	80	103,5
96,3	259,5	200	243	96,4	191	96	88,5
112	259,5	240	239	112	181	112	78,5
128	258	280	234	128	167	128	72,5
144	256,5	320	234	144	155	144	64,5
160	256,5	360	223	160	146,5	160	60,5
176	256,5	400	221	176	136,5	176	55,5
192	256,5	500	211	192	128,5	192	53,5
208	256,5	550	207	208	121,5	208	48
224	255	600	200	224	116,5	224	45
240	255	650	195	240	109,5	240	44
256	255	700	187	256	104,5	256	40
272	252	750	183	272	99,5	272	39
288	252	800	177	288	94,5	288	39
304	250,5	850	170	304	90,5	304	36
320	250,5	900	165	320	88,5	320	34
336	249	950	161	336	84,5	336	32
352	249	1000	156	352	80,5	352	32
368	244,5			368	76,5	368	32
384	244,5			384	76,5	384	32
400	244,5			400	72,5	400	32
1181	182						
1750	143,5						
1930	136						
1000	195,5						
900	204,5						
800	211						
2000	133						

Tabelle 5: Die logarithmierten Werte von Frequenz und effektivem Verstärkungsfaktor.

Schaltung: 1		2		3		4	
$\log \nu$	$\log V'_{\text{eff}}$	$\log \nu$	$\log V'_{\text{eff}}$	$\log \nu$	$\log V'_{\text{eff}}$	$\log \nu$	$\log V'_{\text{eff}}$
-0,916	-0,001 92	-0,916	-0,009 74	-0,916	-0,007 80	-0,916	-0,0498
2,80	-0,001 92	3,00	-0,009 74	2,80	-0,0236	2,80	-0,135
3,48	-0,001 92	3,69	-0,009 74	3,48	-0,0746	3,48	-0,342
3,88	-0,001 92	4,38	-0,0137	3,88	-0,113	3,88	-0,550
4,16	-0,001 92	4,79	-0,0395	4,20	-0,190	4,16	-0,759
4,39	-0,001 92	5,08	-0,0275	4,41	-0,238	4,38	-0,911
4,57	-0,001 92	5,30	-0,0599	4,57	-0,299	4,56	-1,07
4,72	-0,001 92	5,48	-0,0765	4,72	-0,353	4,72	-1,19
4,85	-0,007 72	5,63	-0,0976	4,85	-0,433	4,85	-1,27
4,97	-0,0136	5,77	-0,0976	4,97	-0,508	4,97	-1,38
5,08	-0,0136	5,89	-0,146	5,08	-0,564	5,08	-1,45
5,17	-0,0136	5,99	-0,155	5,17	-0,635	5,17	-1,53
5,26	-0,0136	6,21	-0,201	5,26	-0,695	5,26	-1,57
5,34	-0,0136	6,31	-0,220	5,34	-0,751	5,34	-1,68
5,41	-0,0194	6,40	-0,255	5,41	-0,793	5,41	-1,74
5,48	-0,0194	6,48	-0,280	5,48	-0,855	5,48	-1,77
5,55	-0,0194	6,55	-0,322	5,55	-0,902	5,55	-1,86
5,61	-0,0313	6,62	-0,343	5,61	-0,951	5,61	-1,89
5,66	-0,0313	6,68	-0,377	5,66	-1,00	5,66	-1,89
5,72	-0,0372	6,75	-0,417	5,72	-1,05	5,72	-1,97
5,77	-0,0372	6,80	-0,447	5,77	-1,07	5,77	-2,02
5,82	-0,0432	6,86	-0,472	5,82	-1,11	5,82	-2,09
5,86	-0,0432	6,91	-0,503	5,86	-1,16	5,86	-2,09
5,91	-0,0615			5,91	-1,21	5,91	-2,09
5,95	-0,0615			5,95	-1,21	5,95	-2,09
5,99	-0,0615			5,99	-1,27	5,99	-2,09
6,68	-0,209						
6,80	-0,240						
6,91	-0,285						
7,07	-0,357						
7,47	-0,594						
7,57	-0,648						
7,60	-0,670						

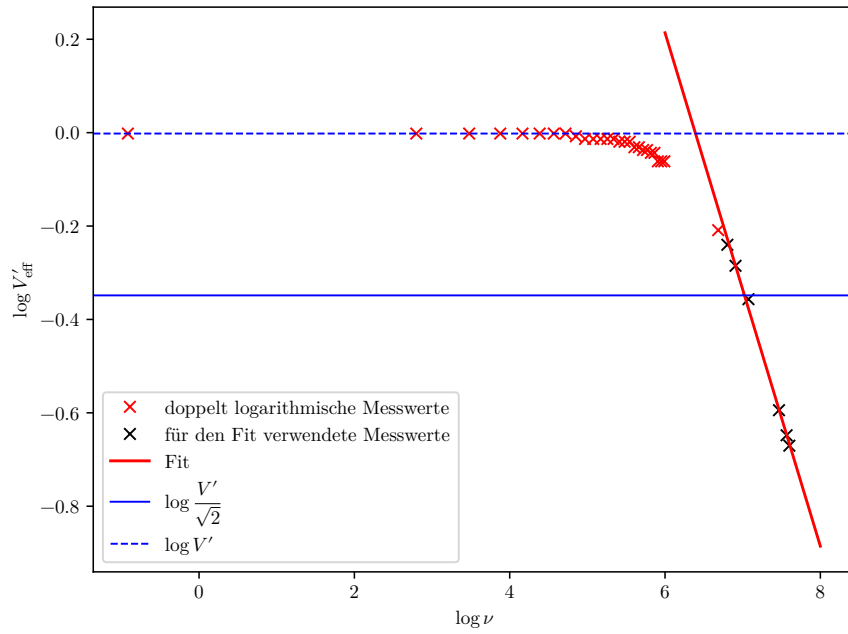


Abbildung 6: Messwerte mit Schaltung 1.

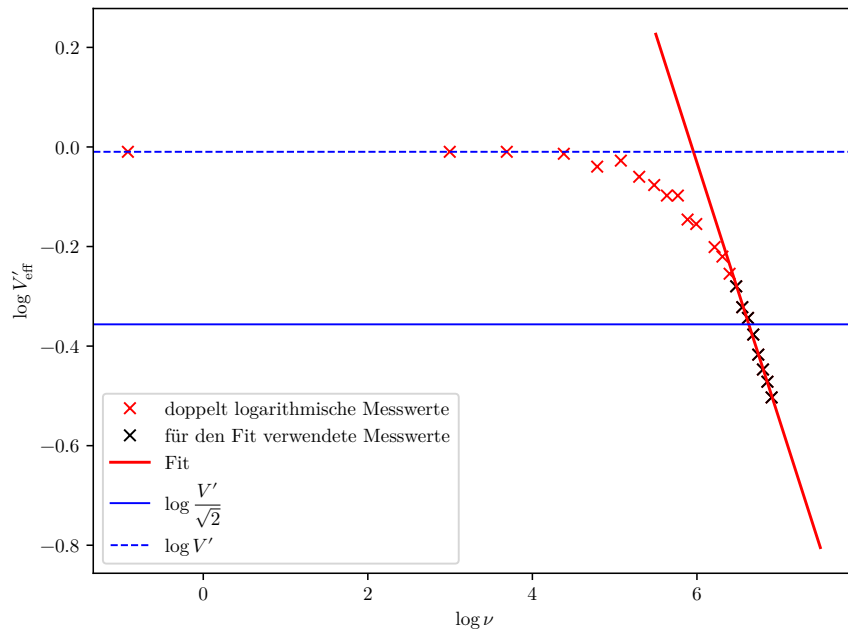


Abbildung 7: Messwerte mit Schaltung 2.

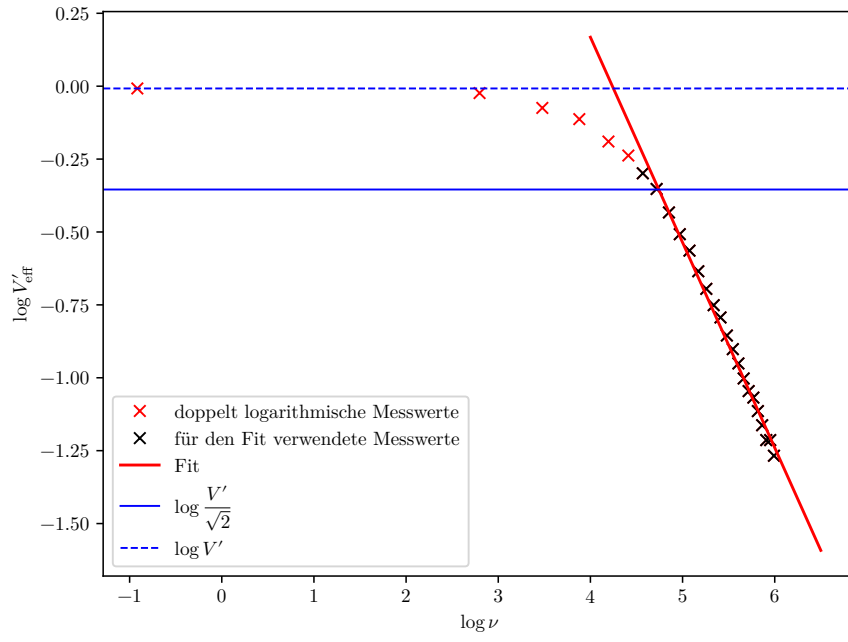


Abbildung 8: Messwerte mit Schaltung 3.

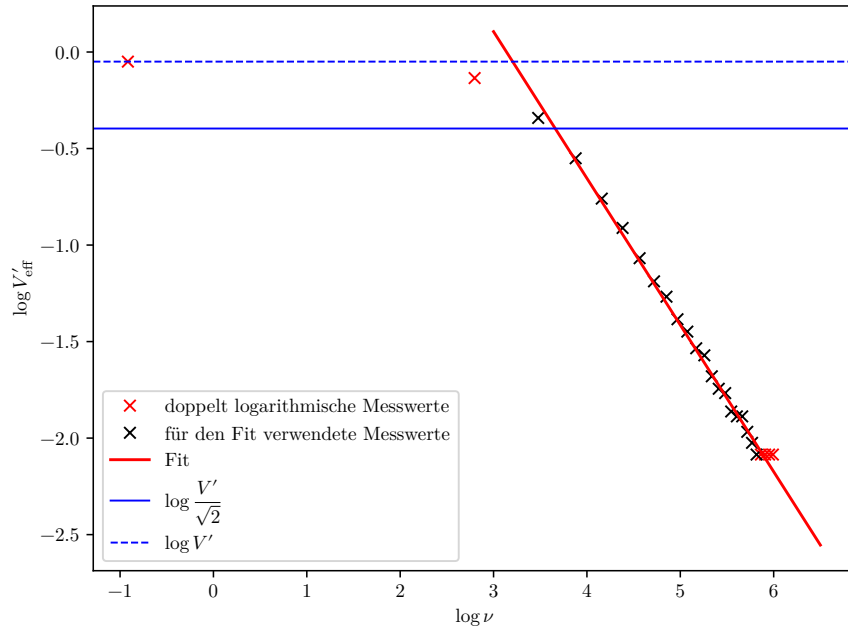


Abbildung 9: Messwerte mit Schaltung 4.

4.3 Differentiator und Integrator

Diese beiden Schaltungen haben aufgrund eines technischen Defektes nicht funktioniert. In dem Signal waren ungewollte höher frequente Schwingungen zu sehen. Dadurch war eine Aufnahme des Frequenzverhaltens unmöglich. Das Problem ließ sich auch nicht beheben. Am Ende hat sich herausgestellt, dass es scheinbar ein defekter Anschluss am Entwicklerboard war.

4.4 Schmitt-Trigger

In Abbildung 10 ist eine Bildschirmaufnahme des Eingangs- und des Ausgangssignals des Schmitt-Triggers zu sehen. Dabei ist das Sinus-Signal das Eingangssignal und das Rechteck-Signal das Ausgangssignal.

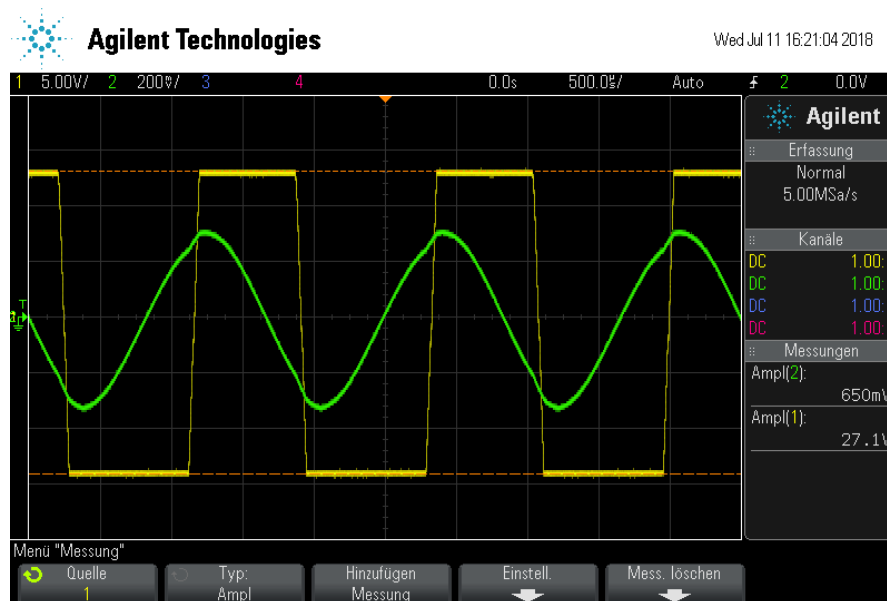


Abbildung 10: Bildschirmaufnahme Schmitt-Trigger.

Die gemessenen Scheitelspannungen sind:

$$U_{e,\text{ein}} = (278 \pm 5) \text{ mV}$$

$$U_{e,\text{aus}} = (-249 \pm 5) \text{ mV}.$$

Als Ausgangsspannung werden

$$U_B = (13,0 \pm 0,1) \text{ V}$$

$$-U_B = (-14,0 \pm 0,1) \text{ V}$$

gemessen und die verwendeten Widerstände betragen:

$$R_1 = (470 \pm 4) \Omega$$

$$R_P = (33,1 \pm 0,2) \text{ k}\Omega.$$

Mit diesen Werten ergeben sich nach den Formeln (9) theoretische Werte für die Scheitelspannungen:

$$U_{e,\text{ein}} = (199 \pm 3) \text{ mV}$$

$$U_{e,\text{aus}} = (-185 \pm 2) \text{ mV}.$$

4.5 Oszillator Schaltung

Für diese Schaltung war aus dem gleichen Grund, wie bei den Differentiator- und Integratorschaltungen, keine Messung möglich. Die Werte haben wir daher von dem Betreuer erhalten. Sie sind in Abbildung 11 dargestellt.

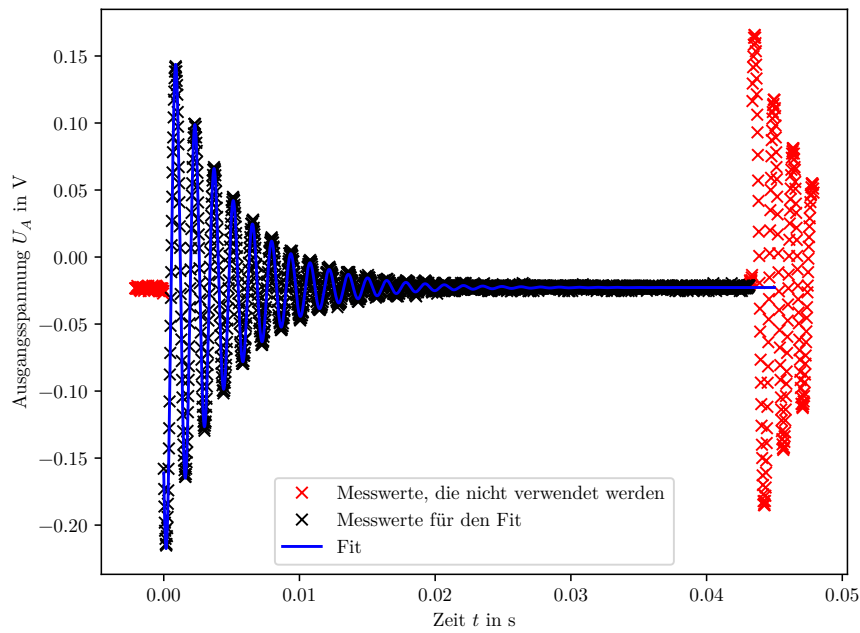


Abbildung 11: Werte und Fit zu der Oszillator Schaltung.

Es werden alle Werte aussortiert, die vor der ersten Anregung und nach der zweiten Anregung durch die Rechteckspannung liegen. Die restlichen Werte werden anschließend nach einer Funktion

$$f(t) = a \cdot \exp\left(\frac{-1 \cdot (t - b)}{20 \cdot c}\right) \cdot \sin\left(\frac{(t - b)}{c}\right) + d$$

gefittet. Als Startwerte für den Fit dienen dabei:

$$a = 200 \text{ mV}$$

$$b = 0 \text{ s}$$

$$c = 224 \mu\text{s}$$

$$d = -20 \text{ mV}.$$

Bei dem Fit ergeben sich folgende Parameter:

$$a = (-210,5 \pm 0,2) \text{ mV}$$

$$b = (168,9 \pm 0,3) \mu\text{s}$$

$$c = (225,00 \pm 0,02) \mu\text{s}$$

$$d = (-22,74 \pm 0,03) \text{ mV}.$$

Die verwendeten Bauteile haben die Werte:

$$R = 9,96 \text{ k}\Omega$$

$$C_1 = 21,5 \text{ nF}$$

$$C_2 = 23,6 \text{ nF}$$

$$10R = 99,6 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = 996 \Omega$$

Da die Werte der Kapazitäten eine etwas größere Differenz besitzen, werden diese beiden Werte gemittelt. Der Mittelwert ist: $C = (22,6 \pm 1,0) \text{ nF}$. Damit wird jetzt der Theoriewert für die Konstante c des Fits berechnet. Nach Formel (10) folgt:

$$R \cdot C = (225 \pm 10) \mu\text{s}$$

und

$$\tau = 20 \cdot RC = (4,49 \pm 0,21) \text{ ms}.$$

Aus dem Fit ergibt sich

$$\tau = 20 \cdot c = (4,4999 \pm 0,0004) \text{ ms}.$$

5 Diskussion

Tabelle 6: Die Ergebnisse zu dem gegengekoppelten Linearverstärker.

Schaltung	V'	$\frac{R_N}{R_1}$	ν'_g in kHz	$\nu'_g \cdot V'$ in kHz	V
1	0,998	≈ 1	$(1,12 \pm 0,32) \cdot 10^3$	$(1,12 \pm 0,32) \cdot 10^3$	≈ 246
2	0,990	≈ 2	$(7,6 \pm 1,9) \cdot 10^2$	$(7,5 \pm 1,9) \cdot 10^2$	≈ 2
3	0,992	≈ 21	115 ± 16	114 ± 16	≈ 1
4	0,951	≈ 71	$38,9 \pm 3,5$	$37,0 \pm 3,4$	≈ 1

Auffällig ist, dass bei den gegengekoppelten Linearverstärkerschaltungen die maximale Ausgangsspannung immer gleich war und etwa der Eingangsspannung entsprach. Der Verstärkungsfaktor V' ist also immer ≈ 1 . Bei der ersten Schaltung stimmt das. Doch bei den Anderen müsste er entsprechend dem Widerstandsverhältnis 2, 21 bzw. 71 mal so groß sein.

Die Abweichung in V' wirkt sich auf alle damit zusammenhängenden Ergebnisse aus. Das Verstärkung-Bandbreite-Produkt ist nicht konstant. Die Ergebnisse der vier Schaltungen diesbezüglich liegen alle in unterschiedlichen Größenordnungen. Das kann aber nicht vollständig auf die Abweichung in V' zurückgeführt werden. Selbst mit den Widerstandsverhältnissen sind sie nicht konstant. Also muss es bei den Grenzfrequenzen auch eine Abweichung geben, die allerdings auch indirekt durch den Verstärkungsfaktor zustande kommen könnte. Bei der Abschätzung von V ist höchstens der Wert von Schaltung 1 sinnvoll. Der Wert für Schaltung zwei entspricht ungefähr dem Widerstandsverhältnis und die Werte für die anderen Schaltungen sind sogar kleiner als das jeweilige Widerstandsverhältnis. Damit sind sie viel zu klein. Trotz alledem ist das Tiefpassverhalten des gegengekoppelten Linearverstärkers gut erkennbar und die Grenzfrequenz nimmt sogar mit zunehmendem Widerstandsverhältnis ab.

Das Problem mit der Ausgangsspannung ließ sich am Ende dadurch lösen, dass man den Widerstand, welcher zu dem OPV parallel geschaltet wird, "direkt" in die Schaltung auf dem Entwicklerboard einbaut und nicht "indirekt" über Verkabelungen anschließt. Dadurch hat die Schmitt-Trigger Schaltung später gut funktioniert. Allerdings war die Zeit zu knapp um die ersten Messreihen zu wiederholen. Die Differentiator- und Integratorschaltungen haben leider aus genannten Gründen nicht funktioniert.

Die Ergebnisse für die Scheitelspannungen des Schmitt-Triggers sind:

$$\text{Theorie: } U_{e,\text{ein}} = (199 \pm 3) \text{ mV}$$

$$\text{Gemessen: } U_{e,\text{ein}} = (278 \pm 5) \text{ mV}$$

$$\text{Theorie: } U_{e,\text{aus}} = (-185 \pm 2) \text{ mV}$$

$$\text{Gemessen: } U_{e,\text{aus}} = (-249 \pm 5) \text{ mV}$$

Der Schmitt-Trigger hat gut funktioniert und seine Aufgabe erfüllt. Allerdings sind die gemessenen Scheitelspannungen 1,4 mal so groß, wie die theoretischen Werte. Eventuell

sind dafür die unter der idealen Annahme vernachlässigten Eigenschaften eines realen OPVs verantwortlich oder es hing ebenfalls mit dem defekten Entwicklerboard zusammen. Die Ergebnisse für RC bzw. τ bei der Oszillatorschaltung sind:

Theorie:	$R \cdot C = (225 \pm 10) \mu\text{s}$
Fit:	$c = R \cdot C = (225,00 \pm 0,02) \mu\text{s}$
Theorie:	$\tau = (4,49 \pm 0,21) \text{ms}$
Fit:	$\tau = (4,4999 \pm 0,0004) \text{ms}$.

Damit entsprechen die Werte aus dem Fit genau den theoretischen Werten. Die Daten sind demzufolge sehr gut.

Literatur

- [Hun07] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [JOP+] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u.a. *SciPy: Open source scientific tools for Python*. Version 0.16.0. URL: <http://www.scipy.org/>.
- [Leb] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [Oli07] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.
- [TuD18] Tu-Dortmund. *Versuch 51: Schaltungen mit Operationsverstärkern*. 10. Sep. 2018. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/FP/SKRIPT/V51.pdf>.