

# Praktikumsprotokoll

## Operationsverstärker

André Schendel, Silas Kraus  
Gruppe DO-20

1. Juni 2012

## 1 Emitterschaltung

### 1.1 Aufbau, Arbeitspunkt

Die Emitterschaltung wurde dem Schaltplan aus der Vorbereitungshilfe entsprechend aufgebaut. Zwischen  $U_E$  und  $GND$  wurde ein Spannungsmessgerät geschaltet und damit der Arbeitspunkt  $A = 2.23V$  bestimmt.

### 1.2 Dreiecksspannung

An  $U_E$  wurde eine Dreiecksspannung mit  $f = 1kHz$  angelegt und das Ausgangssignal am Oszilloskop beobachtet:

Tabelle 1: Verstärkung des Transistorverstärkers (Gleichstromgegenkopplung)

$U_E$ (mV)	$U_A$ (V)	Verstärkung
24	-4.16	-173.33
56	-10	-178.57
	<b>Mittelwert</b>	<b>-175.95</b>

Die Schaltung ist invertierend, also hat der Verstärkungsfaktor ein negatives Vorzeichen.

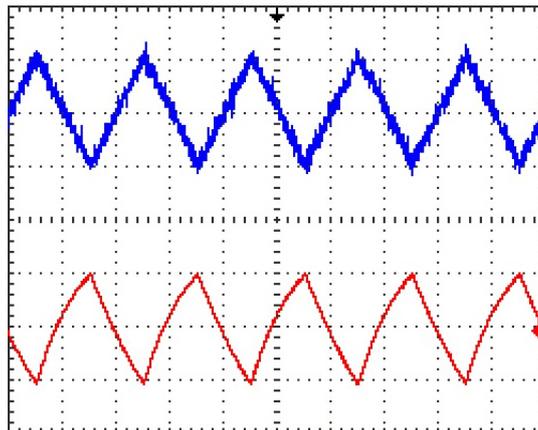


Abbildung 1:  $U_E$  (blau, Skala= 10mV) und  $U_A$  (rot, Skala= 2V) des Transistorverstärkers

Das Eingangssignal ist stark verrauscht, da die Messempfindlichkeit sehr hoch eingestellt werden musste. Im Ausgangssignal zeigen sich leichte Verzerrungen des Dreiecks an den Flanken. Dennoch ist das Signal eindeutig als Dreieckssignal zu identifizieren. Die Verstärkungseigenschaften des Operationsverstärkers sind also recht gut.

### 1.3 Dreiecksspannung ohne $C_E$

Nachdem der Kondensator  $C_E$  entfernt wurde, war die Schaltung nun stromgegekoppelt, das heißt sowohl Gleichstrom als auch hochfrequente Signale wurden gegengekoppelt und schwächer verstärkt.

Tabelle 2: Verstärkung des Transistorverstärkers (Stromgegenkopplung)

$U_A$ (mV)	$U_E$ (mV)	Verstärkung
54	-250	-4.63
106	-480	-4.53
	<b>Mittelwert</b>	<b>-4.58</b>

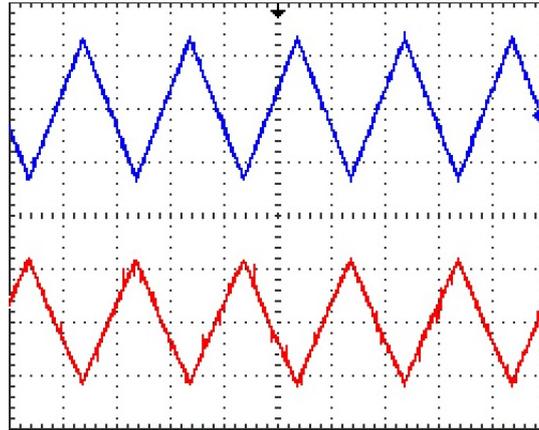


Abbildung 2:  $U_A$  (blau, Skala = 20mV) und  $U_E$  (rot, Skala = 100mV) des stromgegekoppelten TV

Der theoretisch errechnete Wert für die Verstärkung lag bei  $-4.7$ . Damit weicht der gemessene Wert um nur 2.5% davon ab. Dies ist ein sehr gutes Ergebnis, wenn man berücksichtigt, dass für die Berechnungen des theoretischen Werts die Kleinsignalnäherung angewandt werden musste. (Alle Bauteile wurden als linear genähert und alle Spannungsquellen auf Masse gelegt). Die Näherungen waren also berechtigt.

### 1.4 quantitative Messungen

Tabelle 3: Messwerte zur Frequenzabhängigkeit der Verstärkung im TV

Frequenz (Hz)	stromgegen			gleichstromgegen		
	$U_E$ (mV)	$U_A$ (mV)	Verstärkung	$U_E$ (mV)	$U_A$ (V)	Verstärkung
10	90	-92	-1.02	368	1	-2.72
25	104	-224	-2.15	432	-5.68	-13.15
50	106	-348	-3.28	296	-9.6	-32.43
100	107	-450	-4.21	144	-9.8	-68.06
500	106	-490	-4.62	43.5	-7.4	-170.11
1000	106	-500	-4.72	43	-8	-186.05
5000	112	-505	-4.51	43.5	-8.5	-195.40
10000	112	-500	-4.46	43	-8.6	-200.00
50000	112	-490	-4.38	43	-8.4	-195.35
100000	112	-500	-4.46	42	-8.2	-195.24

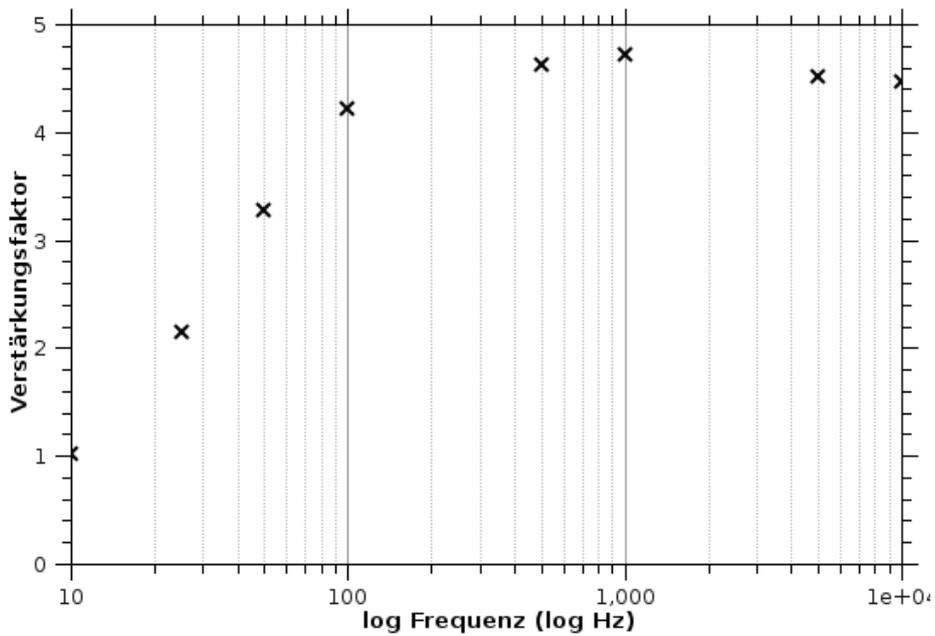


Abbildung 3: stromgeengekoppelt

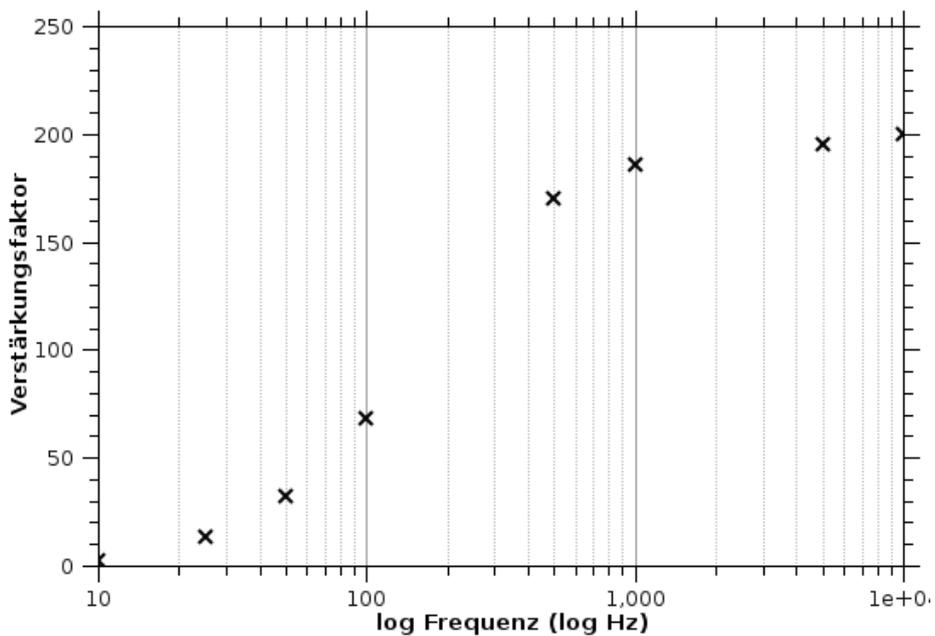


Abbildung 4: gleichstromgeengekoppelt

Ab hier folgende Abkürzung: gleichstromgeengekoppelter Transistorverstärker = GSGKTV und stromgeengekoppelter Transistorverstärker = SGKTV.

Es zeigt sich, dass im SGKTV die Verstärkung viel schneller gegen den Sättigungswert strebt als im GSGKTV. Zudem ist die Verstärkung in letzterem um ein Vielfaches größer.

Dies liegt daran, dass der Kondensator im GSGKTV als Hochpass wirkt. Hohe Frequenzen können den Widerstand überbrücken und werden ungedämpft verstärkt. Je höher also die Frequenz, desto besser kann das Signal den Kondensator passieren und desto mehr wird es verstärkt. Ab einer Frequenz von etwa  $1\text{kHz}$  wird die Impedanz des Kondensators so gering, dass alle höheren Frequenzen ungestört passieren können. Die Verstärkung nimmt nicht weiter zu.

## 2 Operationsverstärker

### 2.1 Nichtinvertierende Grundsaltung

Nun sollte mit einem Operationsverstärker ein nichtinvertierender Verstärker mit 10-facher Verstärkung aufgebaut werden.

Nach den goldenen Regeln ergibt sich eine theoretische Verstärkung von

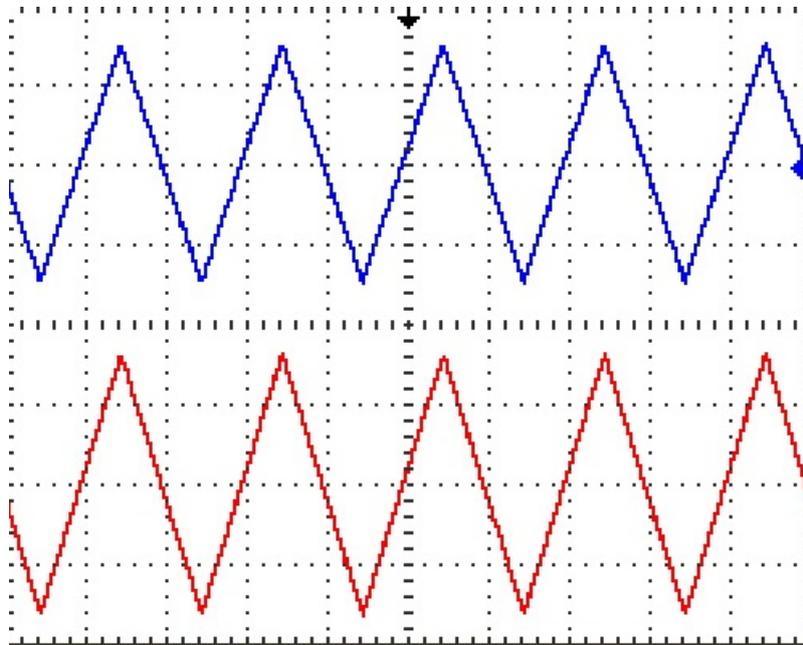
$$v_U = \frac{U_A}{U_E} = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 11$$

Wenn man die Verstärkung aus den Messwerten berechnet, ergibt sich ein gemittelter Wert von

$$v = 10.87$$

Das entspricht einer Abweichung von etwa 1% ,was unter Berücksichtigung der Idealisierung von realen Bauteilen immer noch ein sehr gutes Ergebnis ist.

Abbildung 5: Ausgangsspannung und Eingangsspannung mit dem Oszilloskop aufgenommen ( $Skala_{blau} = 200mV$  und  $Skala_{rot} = 2V$ )



Auf dem obigen Bild kann man noch das Eingangs- und das Ausgangssignal, hier beides Dreiecksspannungen, sehen. (Entgegen der vorherigen Aussage ist auf dem Bild allerdings nur ein Verstärkungsfaktor von 10 zu sehen.)

### 2.2 Nachweis hoher Eingangs- / kleiner Ausgangswiderstand

Als nächstes sollten der hohe Eingangs- und der niedrige Ausgangswiderstand der Schaltung demonstriert werden, dafür wurde ein zusätzlicher Messwiderstand  $R_M$  eingefügt und die Spannungen  $U_E$  und  $U_M$  gemessen. Für den Eingangswiderstand gilt:

$$R_{Ein} = R_M \cdot \left( \frac{U_E}{U_M} - 1 \right)$$

In diesem Versuchsteil wurde allerdings nicht  $U_M$  direkt gemessen, sondern  $U_E - U_M$ . Da aber  $U_E$  ebenfalls gemessen wurde, lässt sich  $U_M$  leicht berechnen und nach obiger Formel ergibt sich ein gemittelter Eingangswiderstandswert von

$$R_{Ein} 0,98M\Omega$$

Tabelle 4: Bestimmung des Eingangswiderstands über  $U_M$  an  $R_M$ 

Eingangswiderstand				
$U_e(V)$	$U_e - U_m(V)$	$U_m(V)$	$U_e/U_m()$	$R_{Ein}(M\Omega)$
1.64	0.84	0.84	1.95	0.95
2.08	1.04	1.04	2	1
2.56	1.28	1.28	2	1
gemittelter Eingangswiderstandswert ( $M\Omega$ )				
		0.98		

Es ist hinfällig, zu erklären, dass dies ein großer Widerstandswert ist, womit die 2. goldene Regel, unter Berücksichtigung realer Bauteile, bestätigt ist.

Danach wurde der Ausgangswiderstand  $R_{Aus}$  grob abgeschätzt.

Dafür wurde ein Potentiometer parallel zum Ausgang geschaltet und dessen Widerstand solange heruntergeregelt, bis die Ausgangsspannung auf die halbe Amplitude absank. An diesem Punkt hat der Widerstandswert des Potentiometers in etwa die gleiche Größe wie der Ausgangswiderstand.

Tabelle 5: Bestimmung des Ausgangswiderstands über Potentiometerwiderstand

Ausgangswiderstand		
$R_{Poti} (\Omega)$	Vollamplitude	Halbamplitude
230	19.2	9.6

Für den Potentiometerwiderstand wurde ein Wert von  $230\Omega$  ermittelt, der dann auch dem Ausgangswiderstand entspricht

$$R_{Aus} = 230\Omega$$

Auch bestätigte sich, unter Berücksichtigung realer Bauteile, die 3. goldene Regel.

### 2.3 Verstärkung in Abhängigkeit von der Frequenz

Zum Abschluss dieses Aufgabenteils sollte die Verstärkung für verschiedene Frequenzen (10/100/1000Hz/10/25/50/75/100kHz) untersucht werden.

Dafür wurde eine sinusförmige Eingangsspannung mit einem Spitze-Spitze-Wert von  $0,5V$  verwendet und oszilloskopisch beobachtet, ebenso wie die Ausgangsspannung.

Tabelle 6: Spannungsmesswerte für verschiedene Frequenzen

Frequenz (Hz)	$U_e(mV)$	$U_a(V)$	$v() = \frac{U_a(mV)}{U_e(mV)}$
10	424	4.6	10.85
100	520	5.68	10.92
1000	530	5.7	10.75
10000	544	5.76	10.59
25000	540	5.7	10.56
50000	544	5.2	9.56
75000	544	4.32	7.94
100000	544	3.52	6.47

Anhand der ermittelten Spannungswerte ist leicht zu erkennen, dass bei höheren Frequenzen, wie auch erwartet, die Verstärkung stark abnimmt. Abhilfe könnte hier eine Gegenkopplung schaffen.

### 3 invertierende Grundsaltung

#### 3.1 invertierender Verstärker mit $v \approx 10$

In dieser Aufgabe sollte man sich mit dem invertierenden Verstärker auseinandersetzen. Nach der 3. goldenen Regel ist  $U_N = U_P$ , und es gilt in diesem Fall

$$v = \frac{U_A}{U_E} = -\frac{R_2}{R_1}$$

wie auch schon in der Praktikumsvorbereitung, hergeleitet wurde. Also ergibt sich eine theoretische Verstärkung von

$$v = -10$$

für die hier verwendeten Widerstände  $R_1 = 1k\Omega$  und  $R_2 = 10k\Omega$

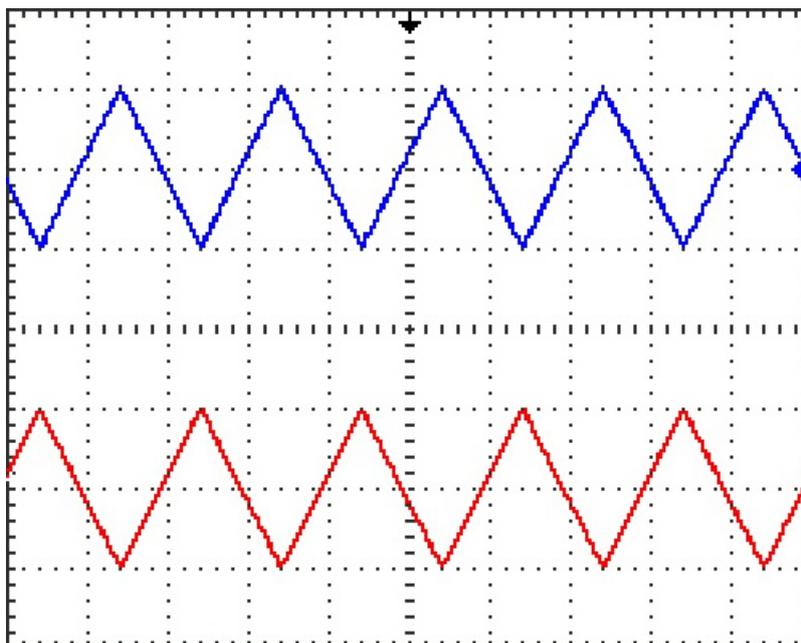
Tabelle 7: Messdaten zu Bestimmung des Verstärkungsfaktors des invertierenden Operationsverstärkers

f (kHz)	$U_e(mV)$	$U_a(V)$	$v()$
1	900	8.8	9.78
1	408	4	9.80
gemittelte Verstärkung $v()$			9.79

Nach den Messdaten ergibt sich ein berechneter Mittelwert von  $v = 9,79$ . Die geringe Abweichung von 2,1% auf den Betrag des Verstärkungsfaktors ergibt sich wieder daraus, dass die Bauteile nicht ideal sind. Das falsche Vorzeichen ergibt sich daraus, dass trotz mehrfachen Hinweis, es vergessen wurde das Vorzeichen der Spannungswerte zu notieren. Es müsste also eigentlich ein negativer Spannungswert für die Ausgangsspannung verwendet werden.

Nichtsdestotrotz zeigt sich auch hier wieder, dass die 3. goldene Regel auch in der Realität angewendet werden darf.

Abbildung 6: Ausgangsspannung und Eingangsspannung mit dem Oszilloskop aufgenommen, um den Verstärkungsfaktor zu berechnen ( $Skala_{blau} = 200mV$  und  $Skala_{rot} = 2V$ )



### 3.2 Addierer

Als nächstes sollte ein Addierer aufgebaut und zwei Signale addiert werden. Da beide Vorwiderstände gleich groß gewählt wurden, ergibt sich die Ausgangsspannung einfach als

$$U_A = -(U_E^1 + U_E^2)$$

In der Praxis wurden verschiedenste Signale überlagert und einige sehr schöne Signalformen erzeugt.

Abbildung 7: Ausgangsspannung mit dem Oszilloskop aufgenommen, wobei eine Eingangsspannung eine Sinusspannung mit einer Frequenz von 1kHz und eine Rechteckspannung mit einer Frequenz von 5kHz, als zweite Eingangsspannung verwendet wurde. (Skala in beiden Fällen 1V)

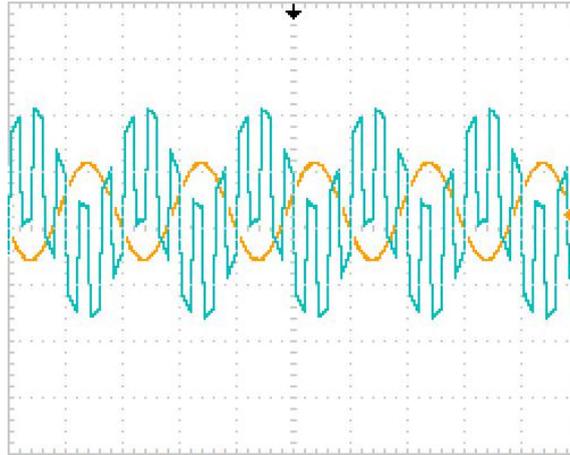


Abbildung 8: Ausgangsspannung mit dem Oszilloskop aufgenommen, wobei eine Eingangsspannung eine Rechteckspannung mit einer Frequenz von 1kHz und eine Dreieckspannung mit einer Frequenz von 2kHz, als zweite Eingangsspannung verwendet wurde. (Skala in beiden Fällen 1V)

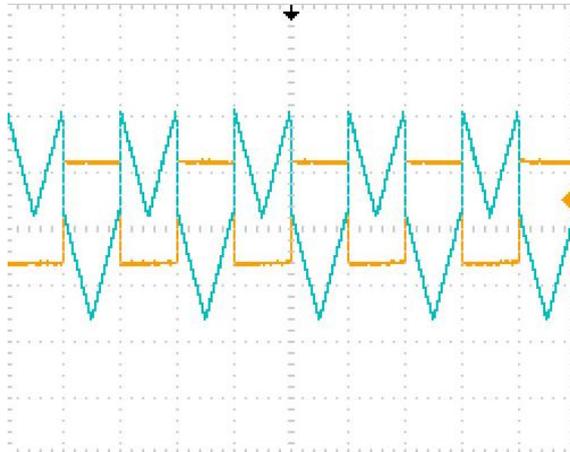


Abbildung 9: Ausgangsspannung mit dem Oszilloskop aufgenommen, wobei eine Eingangsspannung eine Rechteckspannung mit einer Frequenz von 1kHz und eine Sinusspannung mit einer Frequenz von 3kHz, als zweite Eingangsspannung verwendet wurde. (Skala in beiden Fällen 1V)

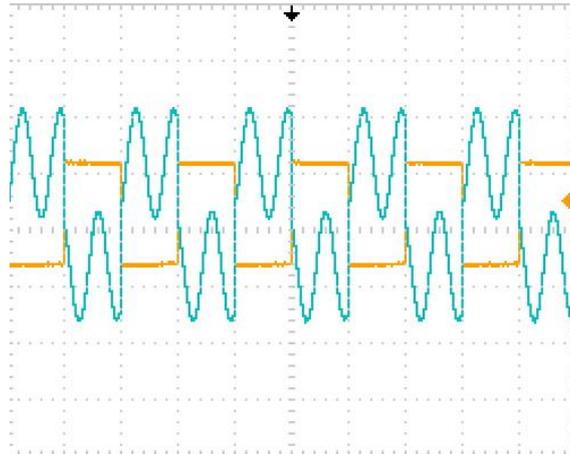


Abbildung 10: Ausgangsspannung mit dem Oszilloskop aufgenommen, wobei eine Eingangsspannung eine Sinusspannung mit einer Frequenz von 1kHz und eine Rechteckspannung mit einer Frequenz von 1,0005kHz, als zweite Eingangsspannung verwendet wurde. (Skala in beiden Fällen 1V)

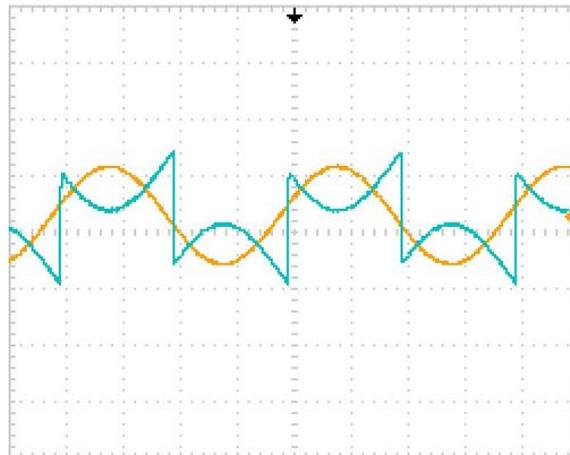


Abbildung 11: Ausgangsspannung mit dem Oszilloskop aufgenommen, wobei eine Eingangsspannung eine Rechteckspannung mit einer Frequenz von 1kHz und eine Rechteckspannung mit einer Frequenz von 1,0001kHz, als zweite Eingangsspannung verwendet wurde. (Skala in beiden Fällen 1V)

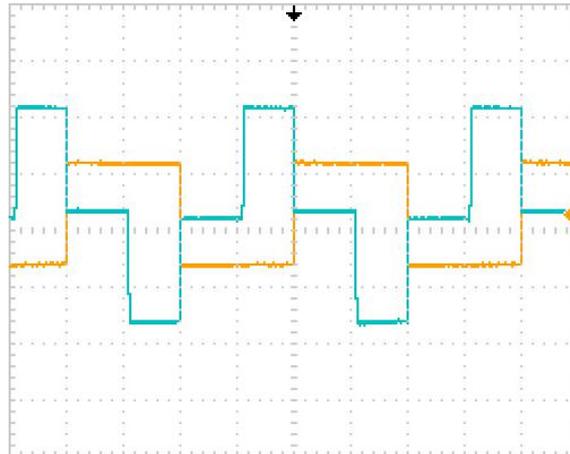
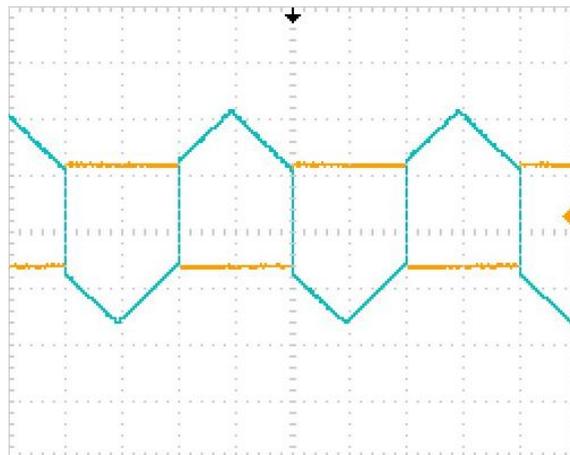


Abbildung 12: Ausgangsspannung mit dem Oszilloskop aufgenommen, wobei eine Eingangsspannung eine Rechteckspannung mit einer Frequenz von 1kHz und eine Dreieckspannung mit einer Frequenz von 1,0001kHz, als zweite Eingangsspannung verwendet wurde. (Skala in beiden Fällen 1V)



### 3.3 Integrierer

Im weiteren sollte die Integriererschaltung betrachtet werden.

Dafür wurden verschiedene Eingangssignale verwendet, um diese vom Integrierer integrieren zu lassen.

Abbildung 13: Rechteckspannung als Eingangssignal und Dreieckspannung als integriertes Ausgangssignal ( $Skala_{blau} = 2V$  und  $Skala_{rot} = 100mV$ )

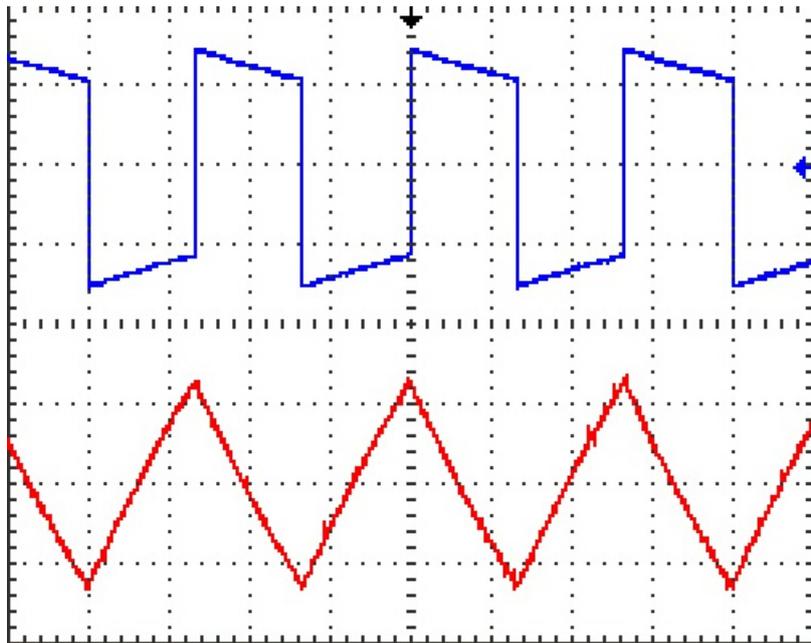


Abbildung 14: Dreieckspannung als Eingangssignal und Parabelbögen als integriertes Ausgangssignal ( $Skala_{blau} = 2V$  und  $Skala_{rot} = 100mV$ )

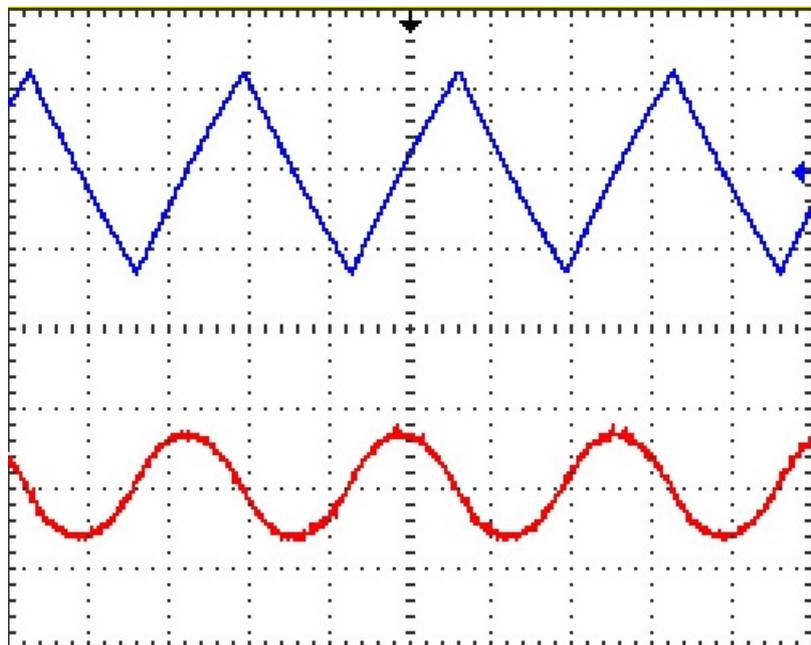
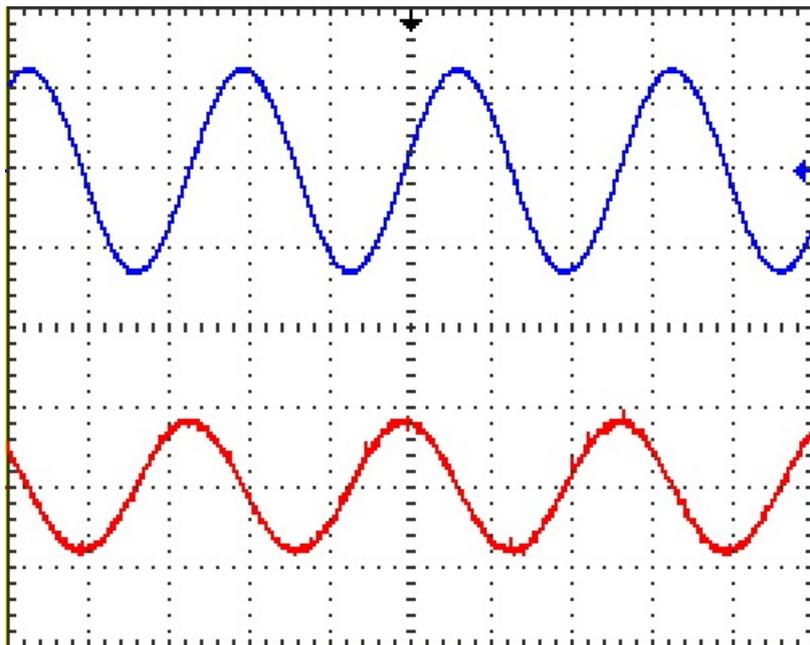


Abbildung 15: Sinusspannung als Eingangssignal und Cosinusspannung als integriertes Ausgangssignal ( $Skala_{blau} = 2V$  und  $Skala_{rot} = 100mV$ )



Wie erwartet und in der Praktikumsvorbereitung hergeleitet, integriert der Integrierte tatsächlich das Eingangssignal, mit negativem Vorfaktor. So wird

Tabelle 8: Integrationen des Integriertes tabellarisch

Rechteckspannung	$\Rightarrow$	Dreieckspannung
const.	$\Rightarrow$	linear
Dreieckspannung	$\Rightarrow$	Parabelbögen
linear	$\Rightarrow$	quadratisch
Sinusspannung	$\Rightarrow$	Cosinusspannung

### 3.4 Differenzierer

Zum Abschluss dieses Aufgabenteils sollte analog zum Integrierer noch der Differenzierer untersucht werden.

Abbildung 16: Dreiecksspannung als Eingangssignal und Rechteckspannung als differenziertes Ausgangssignal ( $Skala_{blau} = 2V$  und  $Skala_{rot} = 1V$ )

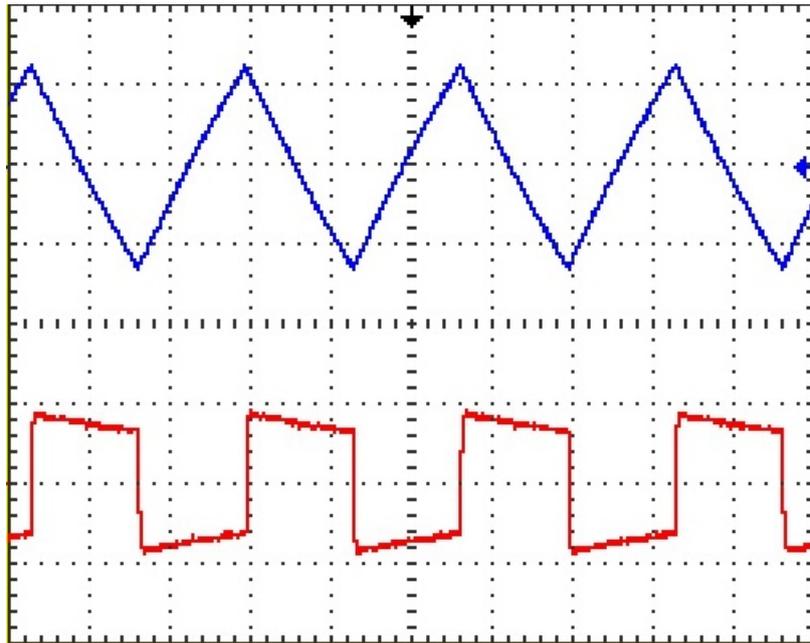


Abbildung 17: Rechteckspannung als Eingangssignal und "Deltaspannung" als differenziertes Ausgangssignal ( $Skala_{blau} = 2V$  und  $Skala_{rot} = 5V$ )

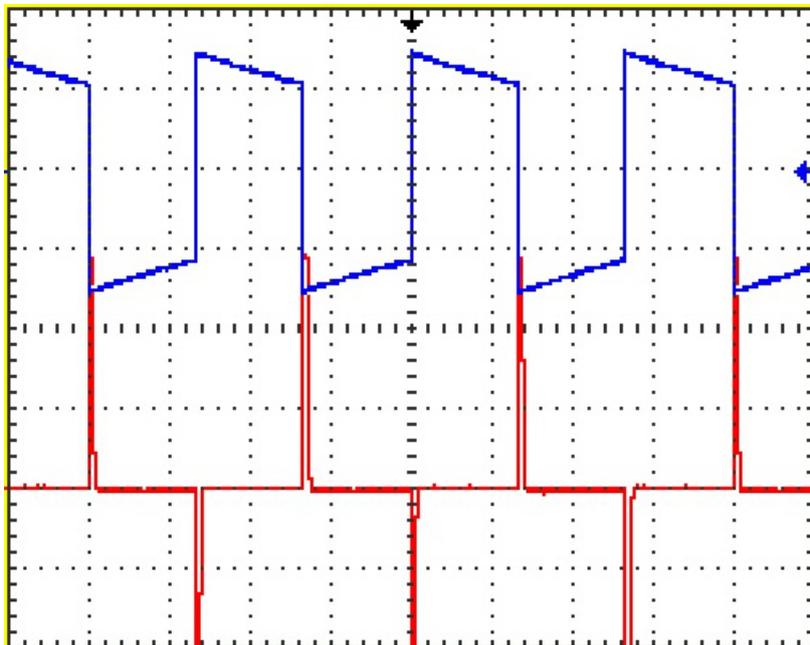
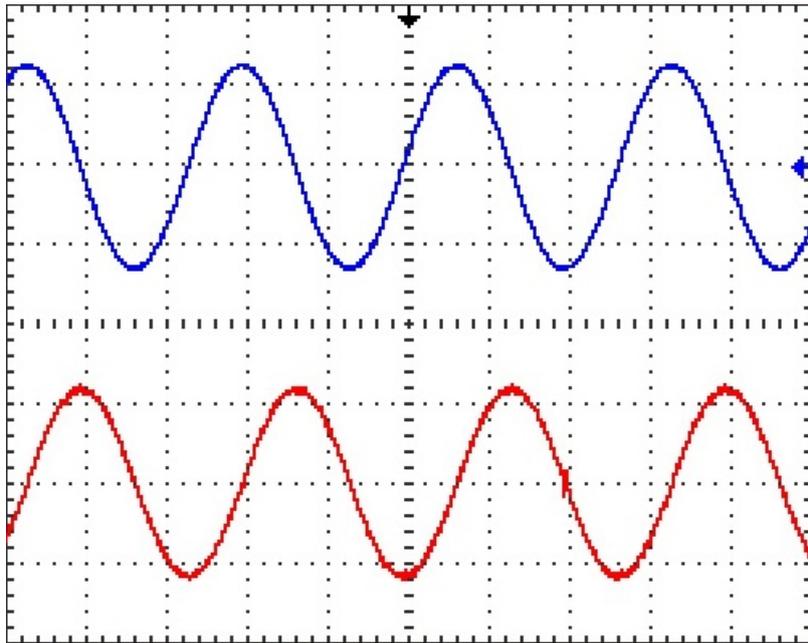


Abbildung 18: Sinusspannung als Eingangssignal und -Cosinusspannung als differenziertes Ausgangssignal ( $Skala_{blau} = 2V$  und  $Skala_{rot} = 1V$ )



Wie erwartet wurde das Eingangssignal, mit negiertem Vorfaktor, differenziert. So wird

Tabelle 9: Differenzierung des Differenzierers tabellarisch

Dreieckspannung	⇒	Rechteckspannung
linear	⇒	const.
Rechteckspannung	⇒	“Delta-Spannung”
Theta-Fkt.-förmig	⇒	Delta-Fkt.-förmig
Sinusspannung	⇒	- Cosinusspannung

## 4 Komplexere Schaltungen

### 4.1 Einweggleichrichter

Der Einweggleichrichter wurde gemäß dem Schaltplan aus der Vorbereitungshilfe aufgebaut. Dann wurde eine Sinusspannung auf den Eingang gelegt und an den beiden Dioden sowie am Ausgang der Schaltung das entstehende Signal oszilloskopisch beobachtet:

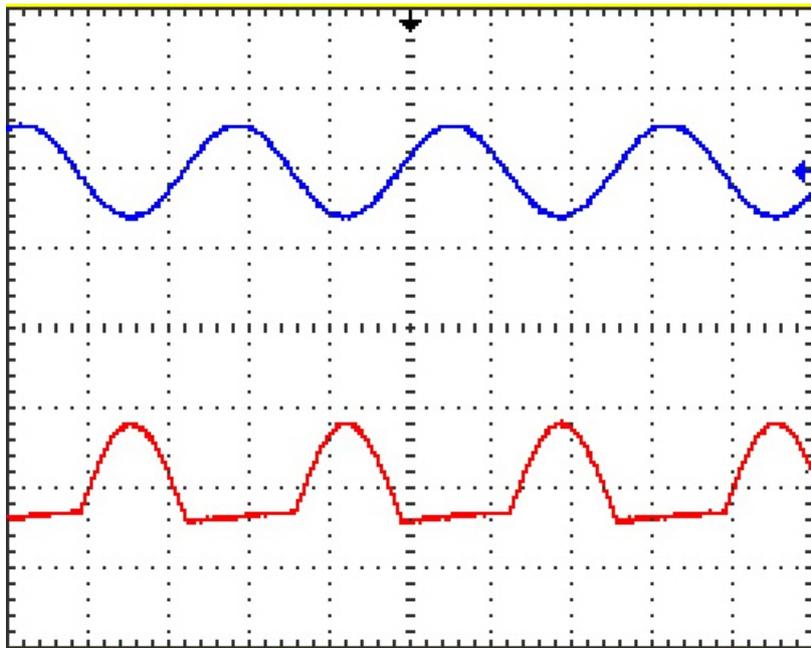


Abbildung 19: Signal an der Diode  $U_{A1}$  ( $Skala_{blau} = 2V$  und  $Skala_{rot} = 1V$ )

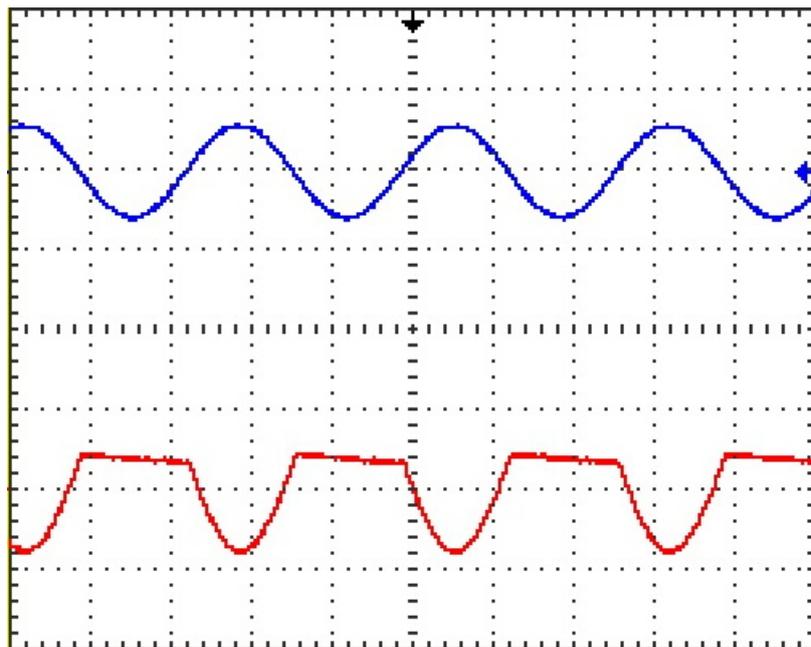


Abbildung 20: Signal an der Diode  $U_{A2}$  ( $Skala_{blau} = 2V$  und  $Skala_{rot} = 1V$ )

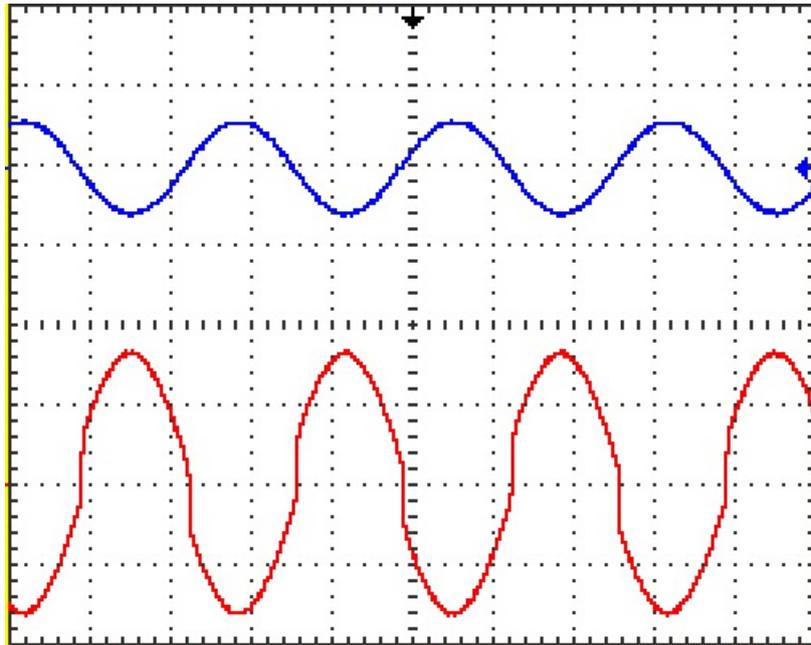


Abbildung 21: Gesamtes Ausgangssignal ( $Skala_{blau} = 2V$  und  $Skala_{rot} = 1V$ )

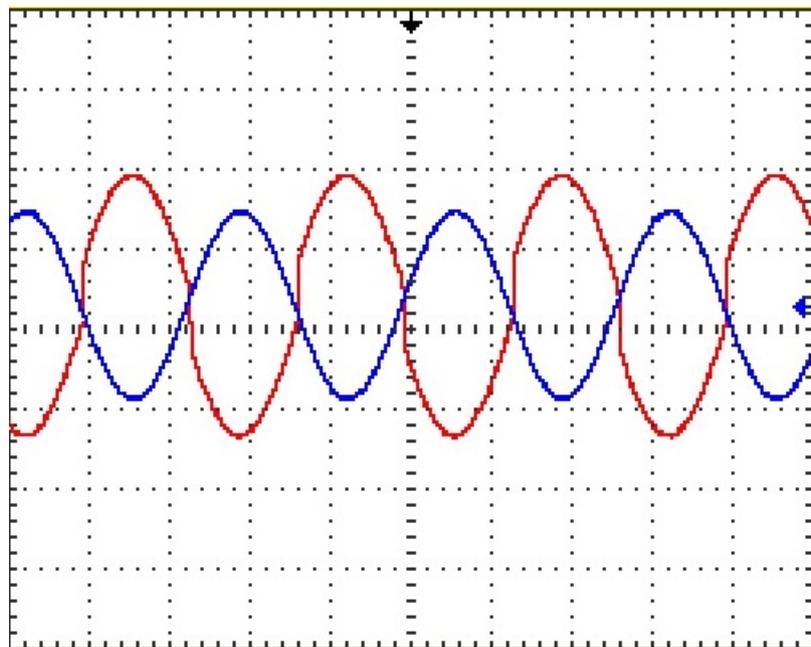


Abbildung 22: Überlagerung von Eingangs- und Ausgangssignal ( $Skala_{blau} = 1V$  und  $Skala_{rot} = 1V$ )

Aus dem letzten Bild zeigt sich, dass die Schaltung das Signal

1. invertiert und
2. nicht perfekt wiedergibt.

In der Praxis wird ein Gleichrichter aber sowieso nicht verwendet, um ein Signal erst aufzuspalten und dann gleich wieder zusammenzufügen.

## 4.2 Signalgenerator

Nachdem der Generator entsprechend aufgebaut wurde, konnten am Oszilloskop auf beiden Kanälen gleichzeitig die Rechteckspannung des Triggers und die Dreiecksspannung des Integrierers beobachtet werden:

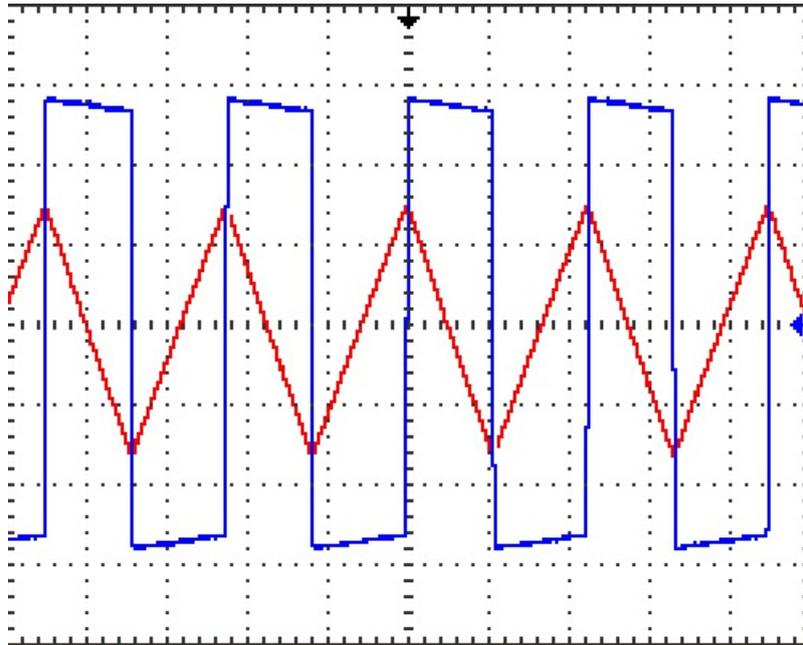


Abbildung 23: Rechteck- und Dreieckssignal des Generators. ( $Skala_{blau} = 5V$  und  $Skala_{rot} = 5V$ )

Während das Dreieckssignal annähernd perfekt ist, wurde das Rechtecksignal verzerrt. Der Praktikumsstutor erklärte uns, dass ein gutes Rechtecksignal technisch sehr schwer zu erzeugen ist. Interessanterweise benötigte der Generator außer der festen Spannungsversorgung kein äußeres Signal, um arbeiten zu können. Statistisch verteilte Spannungserhöhungen in den Bauteilen lösten den Trigger in einen zufälligen Zustand aus und der selbsterregende Prozess stabilisierte sich.

### 4.3 Differentialgleichung

In diesem Fall war nur ein Eingang des Oszilloskops belegt. Die Dämpfung der Schwingungen konnte über das Potentiometer eingestellt werden. Nach dem Einschalten wurden die Schwingungen immer stärker angeregt, bis sie einen Sättigungswert erreichten. Wurde die Dämpfung erhöht, begannen die Amplituden, kleiner zu werden (Schwingfall). Wenn die Dämpfung wieder weggenommen wurde und die Schwingung noch nicht vollständig abgeklungen war, begann der Prozess, sich wieder aufzuschaukeln. Nur wenn die Schwingung vollständig verschwunden war, kehrte sie nicht mehr zurück, wenn die Dämpfung verringert wurde. Dann war erneutes Einschalten nötig.

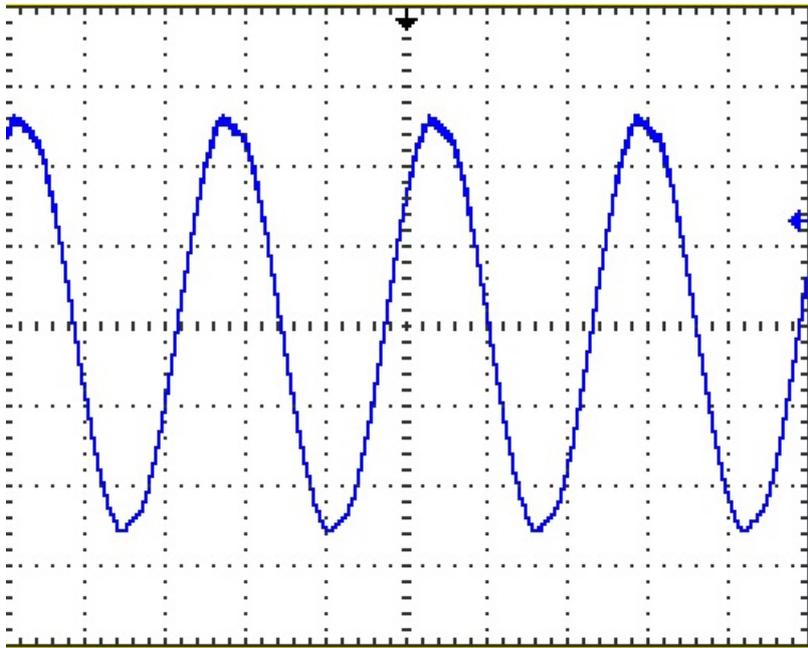


Abbildung 24: die erzeugte Sinusschwingung. ( $Skala_{blau} = 5V$ )

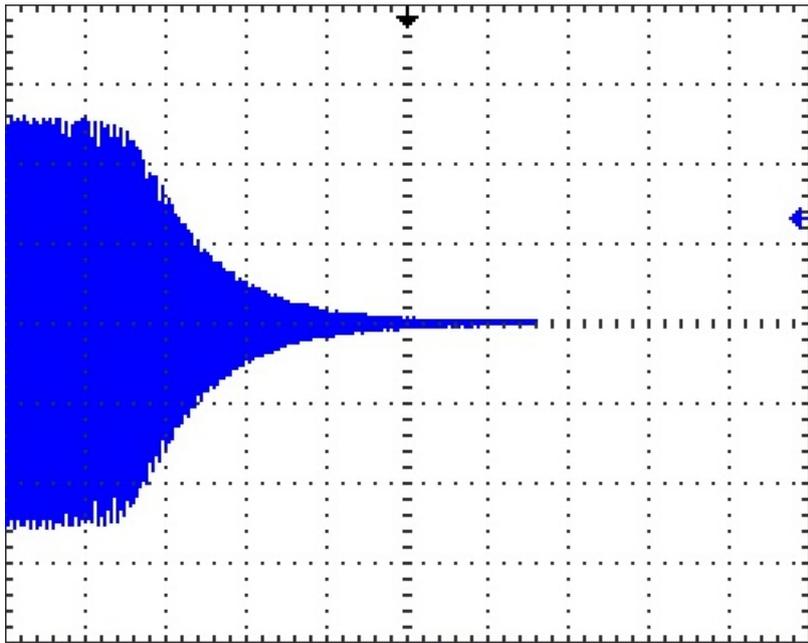


Abbildung 25: Einhüllende der Schwingungen im Schwingfall ( $Skala_{blau} = 5V$ )