



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna University of Technology

# Elektrotechnische Grundlagen der Informatik (LU 182.692)

## Protokoll der 3. Laborübung: "OPV" "Transiente Vorgänge und Frequenzverhalten" b) Messungen

Gruppennr.: 22

Datum der Laborübung: 01.06.2017

Matr. Nr.	Kennzahl	Name
1614835	033 535	Jan Nausner
1633068	033 535	David Pernerstorfer

Kontrolle	✓
Nichtinvertierender OPV	
OPV und Grenzfrequenz	
Invertierender OPV	
Integrierer	
Schmitt-Trigger	

# Contents

1	Nichtinvertierender OPV	3
2	Invertierender OPV	7
3	Integrierer	11
4	Invertierender Schmitt-Trigger	12
5	Anhang - Messwerte	16

# Materialien

- Oszilloskop: Agilent InfiniiVision MSO-X 3054A
- Frequenzgenerator: Agilent 33220A
- Netzteil Agilent U8031A
- Multimeter: Amprobe 37XR-A

## 1 Nichtinvertierender OPV

### Aufgabenstellung

Durch Messung der Ströme und Spannungen an einem nichtinvertierenden OPV soll dessen Verhalten nachvollzogen werden.

### Schaltplan

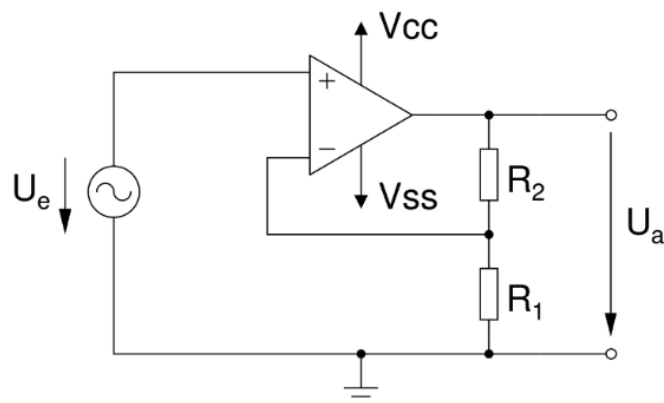


Figure 1: Nichtinvertierender OPV

### Durchführung

Die Schaltung wurde gemäß Schaltplan mit dem OPV-IC LM741 aufgebaut. Die Widerstände wurden mit  $R_1 = 1k\Omega$  und  $R_2 = 47k\Omega$  gewählt um gemäß der Übertragungsfunktion der Schaltung

$$U_a = U_e \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = U_e \left(1 + \frac{47k\Omega}{1k\Omega}\right) = 48 * U_e$$

eine 48-fache Verstärkung der Eingangsspannung zu erreichen. Der OPV wurde mit  $\pm 15V$  Versorgungsspannung betrieben. Um Ströme und Spannungen in der Schaltung zu messen,

wurde eine Eingangsspannung von  $0,1V$  angelegt und die Werte in der Folge mit dem Multimeter erhoben. Dieselben Messungen wurden mit einer Eingangsspannung von  $0,3V$  wiederholt. Um das Verhalten des nichtinvertierenden OPV im Zeitbereich zu untersuchen, wurde eine Rechteckspannung mit  $0,1V_{pp}$  Amplitude und jeweils mit  $100Hz$  und  $10kHz$  Frequenz angelegt. Hierbei wurden Messungen mit dem Oszilloskop durchgeführt.

## Ergebnisse & Diskussion

	$U_e = 0,1V$	$U_e = 0,3V$
$U_a$	$5,43V$	$14,21V$
$U_{R2}$	$4,43V$	$13,91V$
$U_{R1}$	$100mV$	$293mV$
$U_d$	$-0,8mV$	$5mV$
$I_{R2}$	$105\mu A$	$-279\mu A$
$I_{R1}$	$102\mu A$	$-280\mu A$
$I_+$	$0,15\mu A$	$0,07\mu A$
$I_-$	$-0,04\mu A$	$-0,11\mu A$

Table 1: Messergebnisse bei Gleichspannung

Die Verstärkung eines idealen OPV ist unendlich groß, sie wird jedoch durch die Beschaltung herabgesetzt. Die berechnete Verstärkung der Schaltung beträgt 48, bei  $U_e = 0,1V$  beträgt die gemessene Verstärkung 54,3 und bei  $U_e = 0,3V$  47. Da der ideale OPV einen unendlich großen Eingangswiderstand hat, kann man auch hier erkennen, dass an den Eingängen nur ein sehr kleiner Strom fließt. Die Differenzspannung, welche beim idealen OPV  $0V$  beträgt ist mit  $-0,8mV$  bzw.  $5mV$  bei der realen Beschaltung auch sehr klein. Man erkennt, dass an  $R_1$  die Eingangsspannung abfällt.

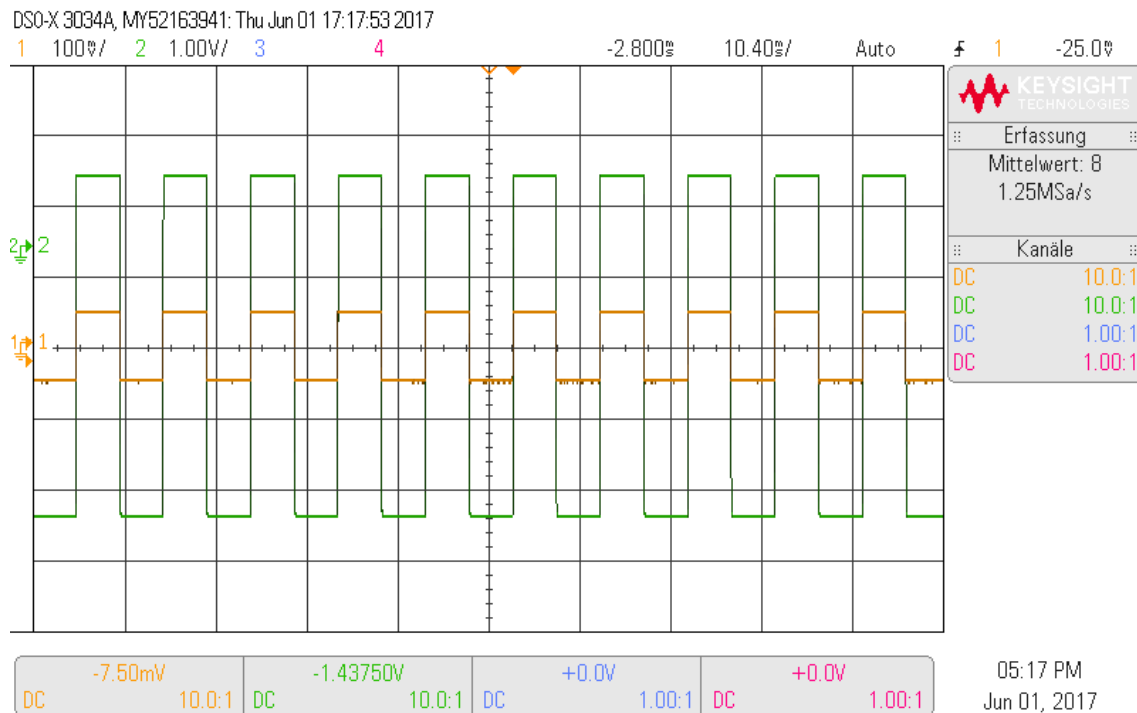


Figure 2: Rechtecksignal mit 100Hz (gelb ...  $U_e$ , grün ...  $U_a$ )

	$pp$	$RMS$
$U_e$	100mV	49,7mV
$U_a$	4,8V	2,4V

Table 2: Messungen mit Oszilloskop

Das Rechteckssignal am Eingang wird am Ausgang 48-fach verstärkt, wie man anhand der Spitze-Spitze-Spannungen erkennen kann. Das Signal am Ausgang entspricht ebenfalls einem Rechteck. Ein- und Ausgangsspannung sind phasengleich.

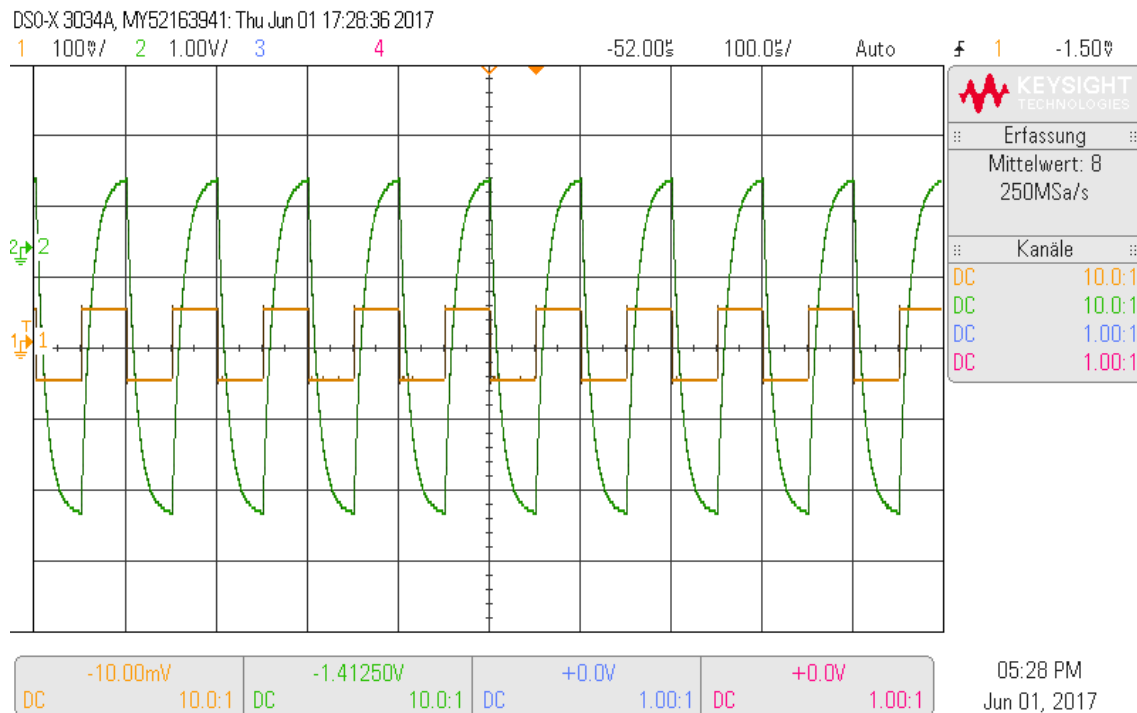


Figure 3: Rechtecksignal mit  $10\text{kHz}$  (gelb ...  $U_e$ , grün ...  $U_a$ )

	$pp$	$RMS$
$U_e$	$100\text{mV}$	$49,7\text{mV}$
$U_a$	$4,7\text{V}$	$1,8\text{V}$

Table 3: Messungen mit Oszilloskop

Das Eingangssignal wird 47-fach verstärkt, wie man anhand der Spitze-Spitze-Spannungen erkennen kann. Jedoch ist am Ausgang kein Rechtecksignal mehr zu erkennen, was sich auf die Tiefpasseigenschaft eines OPV zurückführen lässt, die bei überschreiten der Grenzfrequenz sichtbar wird.

## 2 Invertierender OPV

### Aufgabenstellung

Durch Messung der Ströme und Spannungen an einem invertierenden OPV soll dessen Verhalten nachvollzogen werden. Weiters soll das Frequenzverhalten des beschalteten OPV bei unterschiedlicher Verstärkung untersucht werden.

### Schaltplan

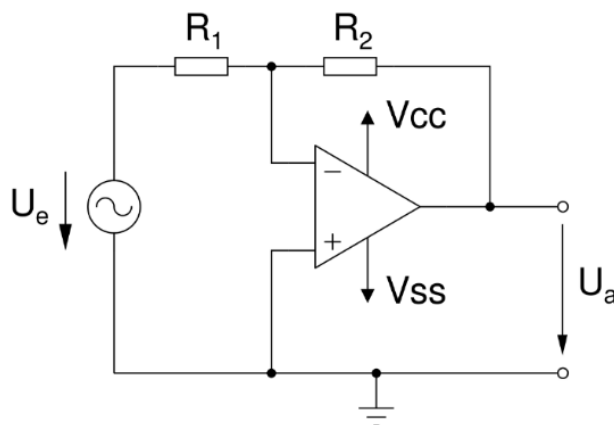


Figure 4: Invertierender OPV

### Durchführung

Die Schaltung wurde gemäß Schaltplan mit dem OPV-IC LM741 aufgebaut. Die Widerstände wurden mit  $R_1 = 1k\Omega$  und  $R_2 = 47k\Omega$  gewählt um gemäß der Übertragungsfunktion der Schaltung

$$U_a = -\frac{R_2}{R_1}U_e = -\frac{47k\Omega}{1k\Omega}U_e = -47 * U_e$$

eine 48-fache Verstärkung der Eingangsspannung zu erreichen. Der OPV wurde mit  $\pm 15V$  Versorgungsspannung betrieben. Um Ströme und Spannungen in der Schaltung zu messen, wurde eine Eingangsspannung von  $0,1V$  angelegt und die Werte in der Folge mit dem Multimeter erhoben. Um das Verhalten des invertierenden OPV im Zeitbereich zu untersuchen, wurde eine Dreiecksspannung mit  $0,1V_{pp}$  Amplitude und jeweils mit  $100Hz$  und  $10kHz$  Frequenz angelegt. Hierbei wurden Messungen mit dem Oszilloskop durchgeführt. Um das Frequenzverhalten der Schaltung zu untersuchen wurde jeweils ein Bode-Diagramm für den invertierenden Verstärker mit -47-facher und -4,7-facher ( $R_2 = 4,7k\Omega$ ) Verstärkung angefertigt. Hierfür wurde als Eingangsspannung ein Sinussignal mit  $0,1V_{pp}$  gewählt, wobei im Bereich zwischen  $10Hz$  und  $1MHz$  gemessen wurde.

## Ergebnisse & Diskussion

	$U_e = 0,1V$
$U_a$	$-5,77V$
$U_{R2}$	$5,69V$
$U_{R1}$	$128mV$
$U_d$	$35mV$
$I_{R2}$	$123\mu A$
$I_{R1}$	$66\mu A$
$I_+$	$-0,02\mu A$
$I_-$	$7,38\mu A$

Table 4: Messergebnisse bei Gleichspannung

Die Verstärkung eines Idealen OPV ist unendlich groß, sie wird jedoch durch die Beschaltung herabgesetzt. Die berechnete Verstärkung der Schaltung beträgt  $-47$ , bei  $U_e = 0,1V$  beträgt die gemessene Verstärkung  $-57,7$ . Da der Ideale OPV einen unendlich großen Eingangswiderstand hat, kann man auch hier erkennen, dass an den Eingängen nur ein sehr kleiner Strom fließt. Die Differenzspannung, welche beim idealen OPV  $0V$  beträgt ist mit  $35mV$  bei der realen Beschaltung auch sehr klein.

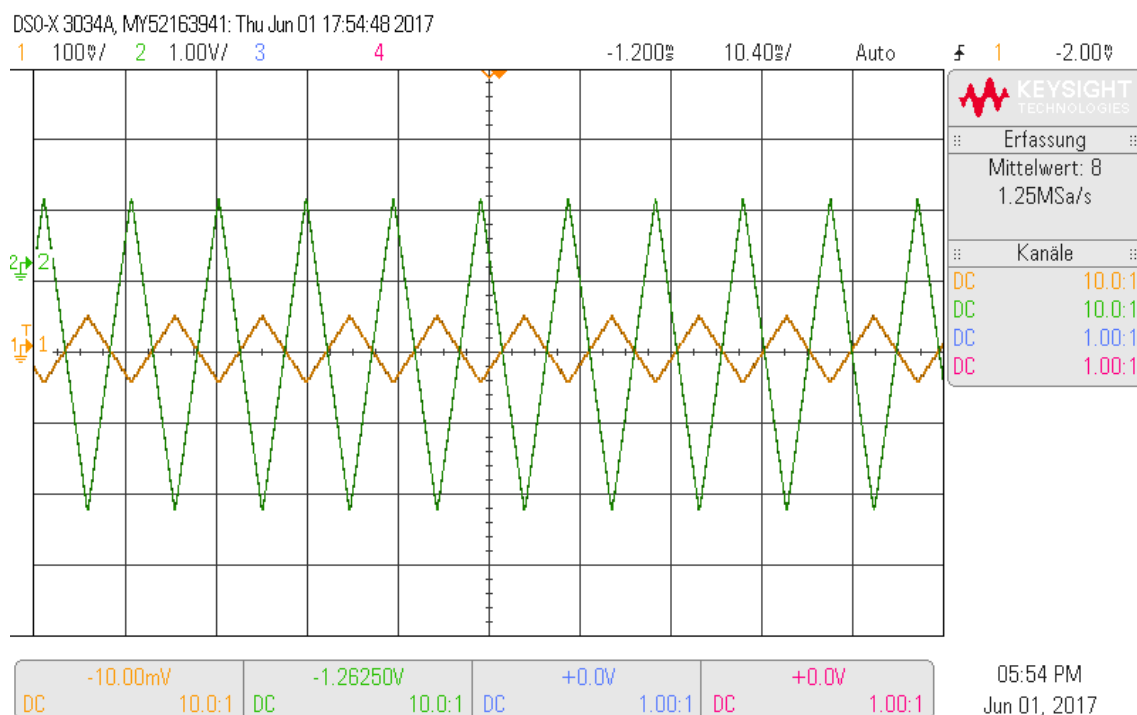


Figure 5: Dreiecksignal mit  $100Hz$  (gelb ...  $U_e$ , grün ...  $U_a$ )



	$pp$	$RMS$
$U_e$	$92mV$	$28mV$
$U_a$	$4,7V$	$1,82V$

Table 5: Messungen mit Oszilloskop

Das Dreieckssignal wird am Ausgang –47-fach (an Spitze-Spitze-Spannung ersichtlich) verstärkt. Am Ausgang ist ein (gegenüber dem Eingang) invertiertes Dreieckssignal erkennbar. Die beiden Signale verlaufen phasengleich.

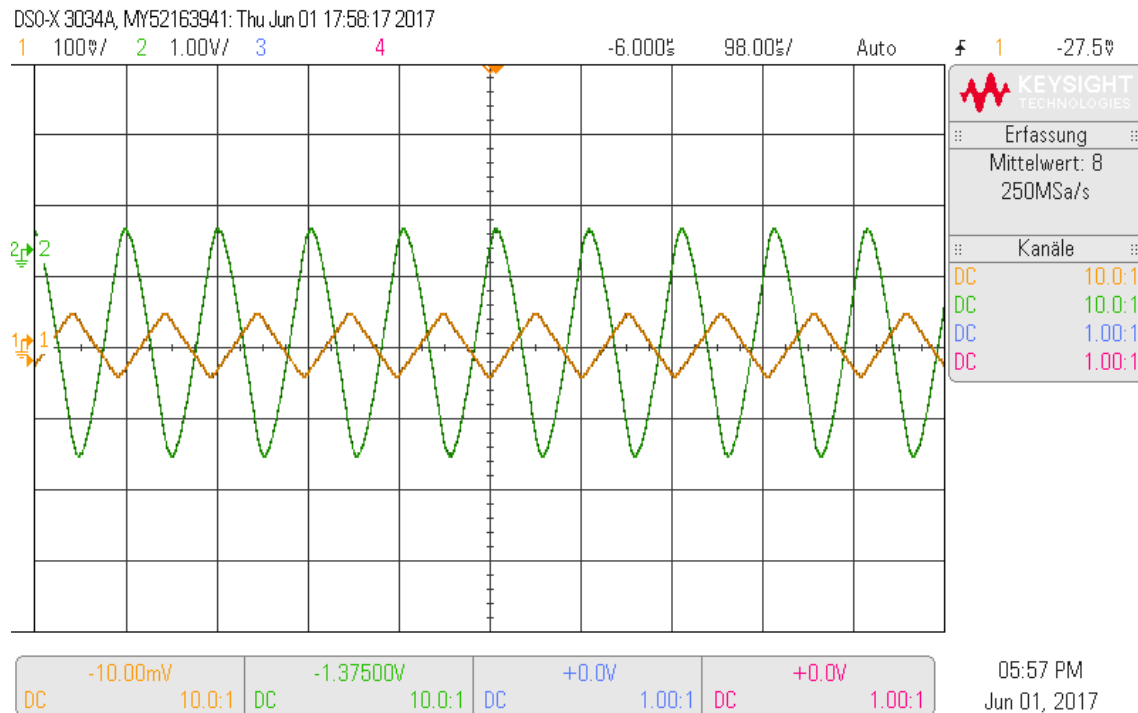


Figure 6: Dreieckssignal mit  $10kHz$  (gelb ...  $U_e$ , grün ...  $U_a$ )

	$pp$	$RMS$
$U_e$	$91mV$	$27mV$
$U_a$	$3,21V$	$1,68V$

Table 6: Messungen mit Oszilloskop

Bei hoher Frequenz wird die Verstärkung vermindert und das Dreieckssignal wird am Ausgang verschliffen. Dies liegt an der Tiefpasseigenschaft der Verstärkerschaltung, welche nach überschreiten der Grenzfrequenz in Erscheinung tritt.

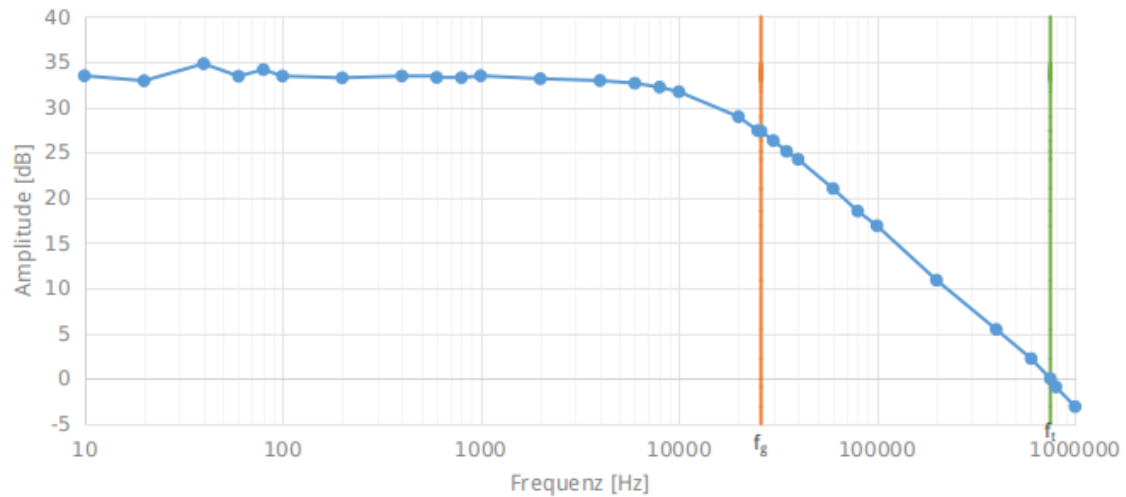


Figure 7: Amplitudengang bei  $-47$ -facher Verstärkung

Da sich ein OPV intern wie ein Tiefpass verhält, fällt die Verstärkung zwischen Grenzfrequenz ( $26\text{kHz}$ ) und Transitfrequenz ( $750\text{kHz}$ ) mit einer Filtersteilheit von ca.  $-20\text{dB/Dekade}$ . Bei der Transitfrequenz wird das Signal nicht mehr verstärkt.

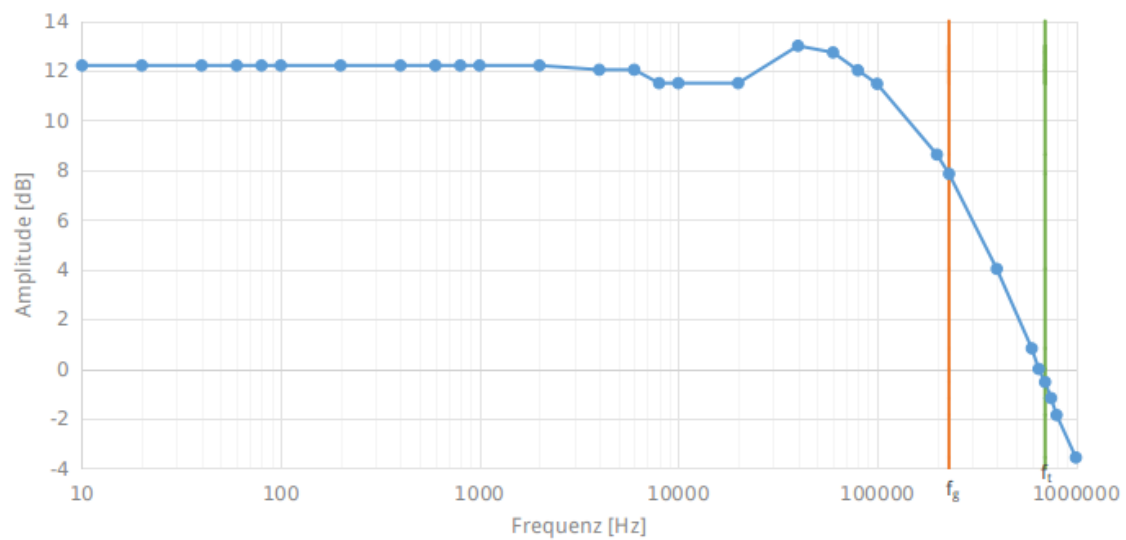


Figure 8: Amplitudengang bei  $-4,7$ -facher Verstärkung

Wenn die Verstärkung der Schaltung verringert wird (auf  $\frac{1}{10}$ ), verschiebt sich die Grenzfrequenz ( $230\text{kHz}$ ) in Richtung höherer Frequenzen und die Dämpfung ist erst eine Dekade später zu erkennen. Die Filtersteilheit beträgt jedoch auch hier ca.  $-20\text{dB/Dekade}$ .

### 3 Integrierer

#### Aufgabenstellung

In der Übung soll eine einfache integrierende Operationsverstärkerschaltung aufgebaut werden. Es sollen die Ströme und Spannungen in dieser Schaltung gemessen und dadurch das Verhalten eines Integrierers nachvollzogen werden.

#### Schaltplan

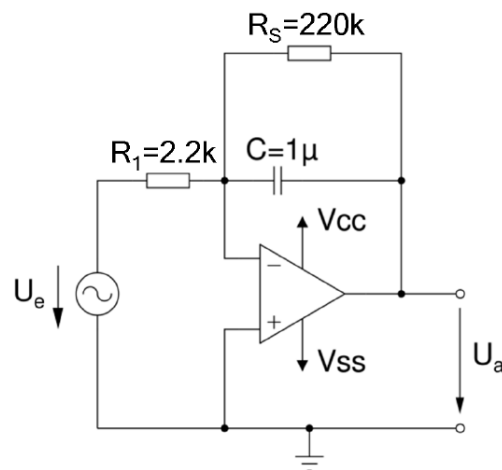


Figure 9: Integrierer

#### Durchführung

Die Schaltung wurde gemäß Schaltplan (siehe 9) mit dem OPV LM324 aufgebaut. Der OPV wurde mit  $\pm 15V$  Versorgungsspannung betrieben. Mittels Funktionsgenerator wurde am Eingang ein periodisches Rechtecksignal mit der Einstellung  $0,1V_{PP}$ , Offset  $0V$ , Duty Circle 50% und Frequenz  $5Hz$  angelegt. Die Wirkungsweise wurde untersucht und die Eingangs- und Ausgangsspannung aufgezeichnet.

## Ergebnisse & Diskussion

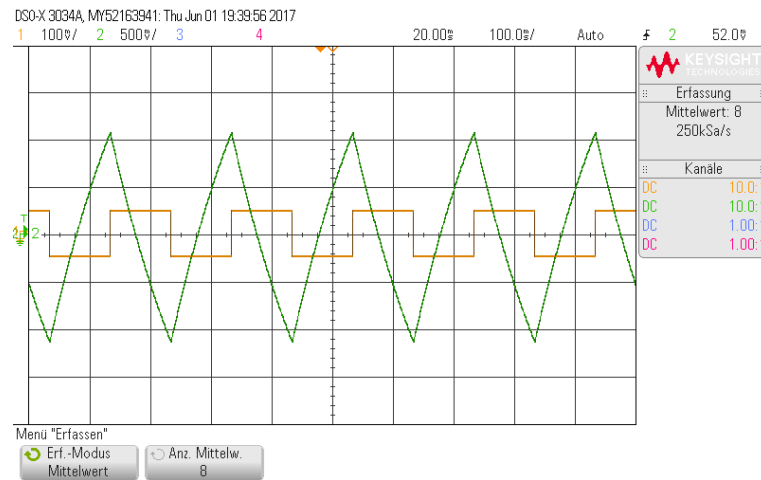


Figure 10: Integrierer Rechtecksignal  $5\text{Hz}$  (gelb ...  $U_e$ , grün ...  $U_a$ )

Der Integrierer ist wie ein invertierender Verstärker aufgebaut, jedoch wird der Widerstands, der den Ausgang des OPV mit dem invertierenden Eingang verbinden, mit einem Kondensator ersetzt. Außerdem wird ein hochohmiger Widerstand  $R_S$  parallel dazu geschaltet, welcher jedoch nur zu Stabilisierung dient. Aufgrund der Kapazität des Kondensators  $C$  ergibt sich die Übertragungsfunktion:

$$U_a = -\frac{1}{R_1 C} \int U_e dt$$

Am Ausgang erhält man also das invertierte Integral der Eingangsspannung über die Zeit. Wie in der Abbildung 10 zu sehen ist, ergibt sich daher mit einem Rechtecksignal am Eingang ein Dreiecksignal am Ausgang. Verwendung findet die Schaltung bspw. als aktiver Filter, in der Analogtechnik zum Generieren von Sägezahnswingungen oder in Analogrechnern.

## 4 Invertierender Schmitt-Trigger

### Aufgabenstellung

In der Übung soll ein invertierender Schmitt-Trigger aufgebaut und dessen Funktionsweise dokumentiert werden.

## Schaltplan

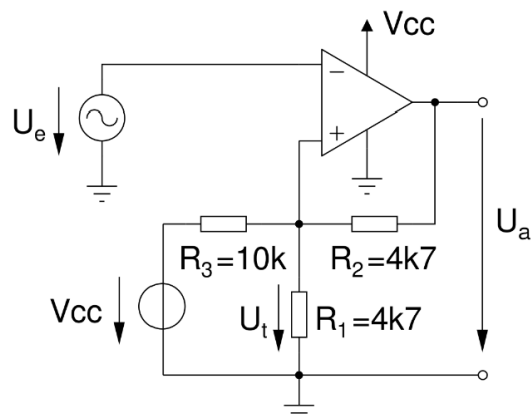


Figure 11: Invertierender Schmitt-Trigger

## Durchführung

Der invertierende Schmitt-Trigger wurde gemäß Schaltplan (siehe 11) mit dem OPV LM324 aufgebaut. Am OPV wurde mit  $+5V$  am positiven Versorgungsanschluss betrieben, der negative Versorgungsanschluss wurde mit Masse verbunden. Mittels Funktionsgenerator wurde am Eingang ein periodisches Sinussignal mit der Einstellung  $5V_{PP}$ , Offset  $2,5V$  und Frequenz  $50Hz$  angelegt. Die Spannungen  $U_a$ ,  $U_e$  und  $U_t$  wurden gemessen und protokolliert (siehe Tabelle 7). Weiters wurden Eingangs- und Ausgangssignal mit dem Oszilloskop im Zeit- und Bildbereich aufgezeichnet (siehe Abbildung 12 und 13).

## Ergebnisse & Diskussion

$U_e(PP)$	$5,11V$
$U_a(PP)$	$3,26V$
$U_t(PP)$	$1,72V$

Table 7: Messung Spannungen Invertierender Schmitt-Trigger

Allgemein schaltet ein Schmitt-Trigger am Ausgang zwischen der positiven bzw. negativen Versorgungsspannung um. Die Schaltschwellen, wo das Ausgangssignal kippt sind im Allgemeinen symmetrisch zur Nulllinie. Um nun die Schaltschwellen auf ein anderes Spannungsniveau zu ändern, welches nicht symmetrisch zur Nulllinie ist, wird der OPV unipolar und mit einer Referenzspannung betrieben. D.h. die negative Versorgungsspannung mit Masse verbunden. Die positive bzw. negative Versorgungsspannung wird hier nicht erreicht, da es sich hier um eine Rail-To-Rail OPV Schaltung handelt.

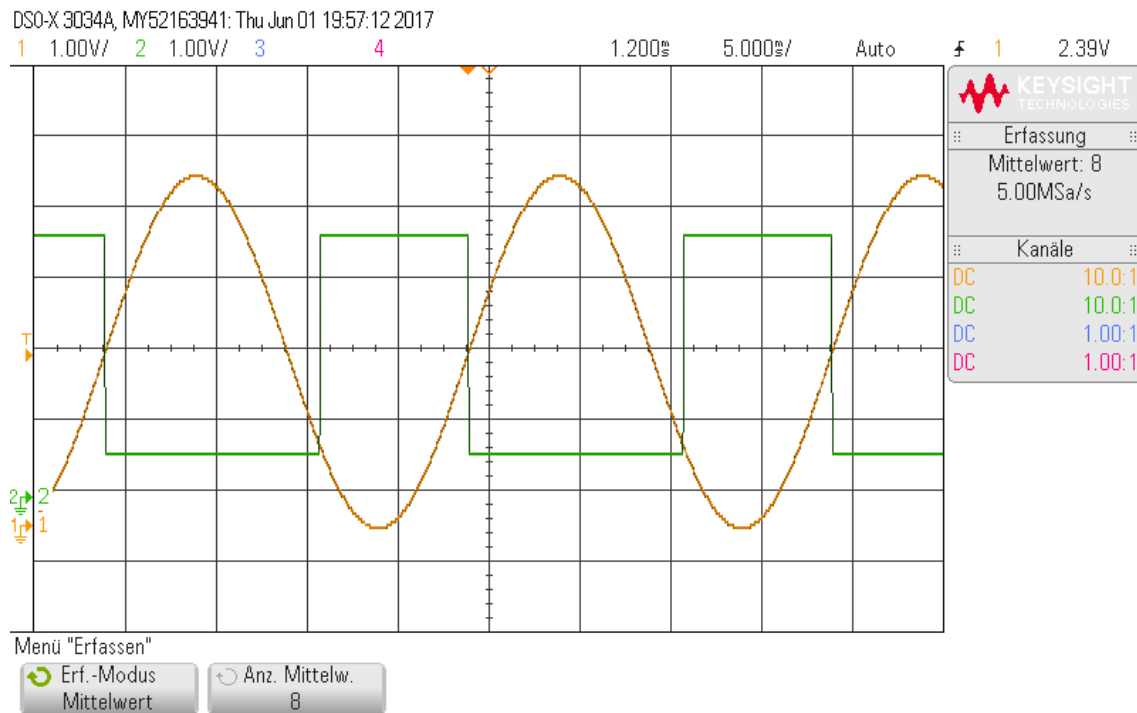


Figure 12: Invertierender Schmitt-Trigger mit  $50\text{Hz}$  Sinussignal (gelb ...  $U_e$ , grün ...  $U_a$ )

Der Schmitt-Trigger arbeitet als Komparator mit Hysterese. Das bedeutet, dass die beiden Eingänge (invertierend und nichtinvertierend) verglichen werden und der Ausgang schaltet entsprechend auf  $U_{low}$  bzw. auf  $U_{high}$ . Wie in Abbildung 12 zu erkennen ist, hängen  $U_e$  und  $U_a$  so zusammen, dass bei den Schwellwerten ( $\approx 1\text{V}$  und  $\approx 2,5\text{V}$ ) der Ausgang entweder auf  $\approx 0,6\text{V}$  bzw. auf  $\approx 3,8\text{V}$  kippt. Die Spannung  $U_t$  ist direkt proportional zu  $U_a$ . Diese Kippstufe kommt daher, dass ein Teil der Ausgangsspannung auf den positiven Eingang des OPV zurückgeführt wird (Mitkopplung). Allgemein benötigt man die Hysterese, da sonst im Bereich der Schaltschwelle die Ausgangsspannung mehrfach kippen könnte.

Bei der Ausgangsspannung  $U_a$  ist mit  $0,6\text{V}$  bzw.  $3,8\text{V}$  ein Unterschied zu den berechneten Werten aus der Simulation zu erkennen ( $0,029\text{V}$  bzw.  $4,39$ ). Dies kommt daher, dass bei der Berechnung ideale Bauelemente angenommen werden. Wird die Amplitude des Eingangssignals verringert, so kann man sehen, dass der Schmitt Trigger am Ausgang nicht mehr schaltet.

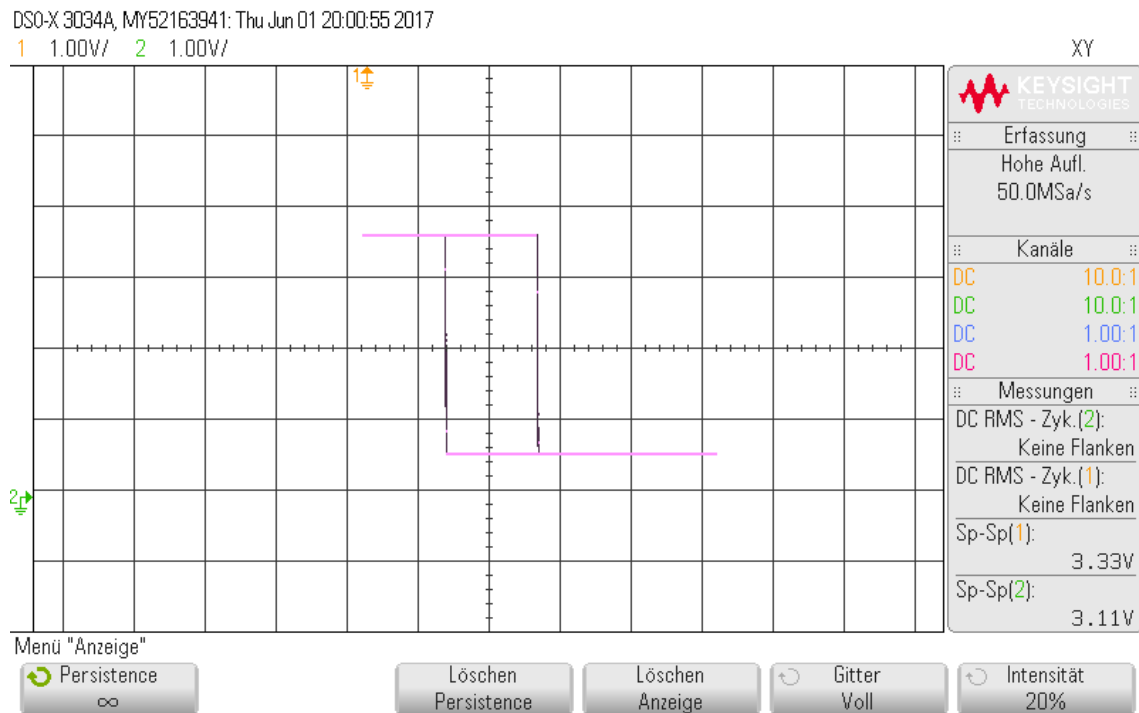


Figure 13: Invertierender Schmitt-Trigger mit Sinussignal (Bildbereich); x-Achse:  $U_e$ ; y-Achse:  $U_a$

Die Abbildung 13 zeigt die Hysterese-Kennlinie des invertierenden Schmitt-Triggers. Auf der x-Achse ist die Eingangsspannung und auf der y-Achse die Ausgangsspannung eingetragen. Der Verlauf sieht so aus, dass die Linie links oben startet. Die Eingangsspannung wird erhöht, ohne dass sich die Ausgangsspannung ändert. Wird der obere Schwellwert des Schmitt-Triggers erreicht (rechts oben), so schaltet der Ausgang auf  $U_{low}$ . Danach steigt die Eingangsspannung weiter, ohne Änderung am Ausgang. Da es sich um ein periodisches Sinussignal handelt, sinkt dann die Eingangsspannung wiederum bis auf den unteren Schwellwert und der Ausgang schaltet wider auf  $U_{high}$ .

Verwendet wird diese Schaltung bspw. zum Erzeugen von binären Signalen oder um eindeutige Schaltzustände aus einem analogen Eingangssignalverlauf zu gewinnen.

## 5 Anhang - Messwerte

f[Hz]	Ue[V]	Ua[V]
10	0,0845	3,99
20	0,091	4,033
40	0,0765	4,21
60	0,0735	3,45
80	0,076	3,88
100	0,095	4,47
200	0,095	4,37
400	0,075	3,53
600	0,095	4,39
800	0,095	4,38
1000	0,093	4,39
2000	0,095	4,32
4000	0,095	4,22
6000	0,095	4,08
8000	0,095	3,88
10000	0,095	3,66
20000	0,097	2,72
25000	0,1	2,35
26000	0,1	2,33
30000	0,1	2,07
35000	0,1	1,805
40000	0,1	1,63
60000	0,1	1,123
80000	0,1	0,843
100000	0,1	0,7
200000	0,1	0,35
400000	0,1	0,187
600000	0,1	0,129
750000	0,1	0,1
800000	0,1	0,09
1000000	0,1	0,07

Figure 14: Messdaten invertierender OPV (-47 Verstärkung)

f[Hz]	Ue[V]	Ua[V]
10	0,125	0,51
20	0,125	0,51
40	0,125	0,51
60	0,125	0,51
80	0,125	0,51
100	0,125	0,51
200	0,125	0,51
400	0,125	0,51
600	0,125	0,51
800	0,125	0,51
1000	0,125	0,51
2000	0,125	0,51
4000	0,125	0,5
6000	0,125	0,5
8000	0,133	0,5
10000	0,133	0,5
20000	0,133	0,5
40000	0,096	0,429
60000	0,096	0,416
80000	0,099	0,395
100000	0,099	0,371
200000	0,1	0,27
230000	0,1	0,247
400000	0,1	0,159
600000	0,1	0,11
650000	0,102	0,102
700000	0,102	0,096
750000	0,103	0,09
800000	0,104	0,084
1,00E+06	0,104	0,069

Figure 15: Messdaten invertierender OPV (-4,7 Verstärkung)



