



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna University of Technology

# Elektrotechnische Grundlagen der Informatik (LU 182.692)

## Protokoll der 3. Laborübung: "Operationsverstärker" a) LTSPICE-Simulationen

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 Verstärker	3
2	Invertierender Verstärker	6
3	Integrierer	10
4	Invertierender Schmitt-Trigger	12

# 1 Nichtinvertierender Verstärker

## 1.1 Aufgabenstellung

Das Verhalten eines OPV als nichtinvertierender Verstärker soll mittels LTSpice simuliert werden.

## 1.2 Schaltplan

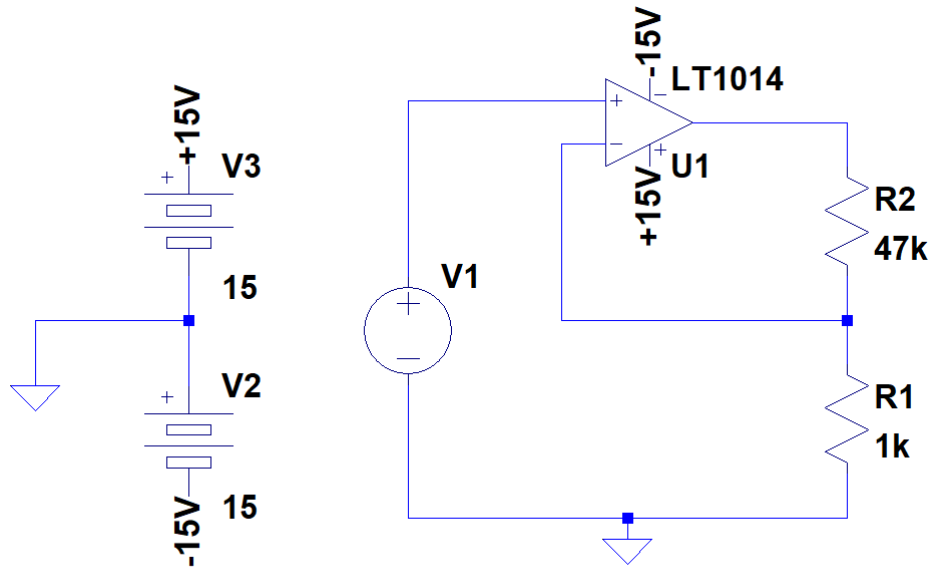


Figure 1: Nichtinvertierender Verstärker

## 1.3 Durchführung

Die Schaltung eines OPV als nichtinvertierender Verstärker wurde mit LTSpice aufgebaut (Abbildung 1). Die Spannungsverstärkung wird mit  $V_u = 1 + \frac{R_2}{R_1}$  berechnet und soll zwischen 40 und 60 liegen. Das bedeutet  $R_2$  muss etwa 40 bis 60 mal größer dimensioniert werden als  $R_1$ . Gewählt wurden die Widerstände  $R_1 = 1k\Omega$  und  $R_2 = 47k\Omega$ . Nun wurde das Verhalten des Systems mit einer DC Eingangsspannung bzw. mit 2 verschiedenen Rechteckspannungen (siehe Angabe) simuliert und diverse Messungen durchgeführt (siehe Ergebnis & Diskussion).

## 1.4 Ergebnis & Diskussion

Strom Widerstand $R_1$	$I_{R1}$	$100,00\mu A$
Strom Widerstand $R_2$	$I_{R2}$	$99,99\mu A$
Spannung Widerstand $R_1$	$U_{R1}$	$100,00mV$
Spannung Widerstand $R_2$	$U_{R2}$	$4,70V$
Spannungsdifferenz Eingang OPV	$U_d$	$0,69\mu V$
Strom Eingang OPV	$I_d$	$12,01nA$
Eingangsspannung	$U_e$	$100mV$
Ausgangsspannung	$U_a$	$4,80V$

Table 1: Messwerte Nichtinvertierender Verstärker bei DC 0,1V

In Abbildung 1 sind die Messwerte des OPVs als nichtinvertierender Verstärker mit einer Gleichspannung von  $100mV$  zu sehen. Grundsätzlich wäre die Verstärkung eines OPVs unendlich groß und die Verstärkung würde bei wenigen  $\mu V$  die positive bzw. negative Versorgungsspannung annehmen. Jedoch wird ein Teil der Ausgangsspannung an den invertierenden Eingang des OPVs zurückgeführt (Gegenkopplung), dadurch kann die Verstärkung geregelt werden. Aufgrund des im Idealfall unendlich großen Eingangswiderstands am OPV fließt zwischen den Eingängen verschwindend geringer Strom ( $12,01nA$ ). Aufgrund der Knotenregel fließt daher an  $R_1$  und  $R_2$  praktisch der gleiche Strom. Weiters ist aufgrund der Maschenregel  $U_{R1} = U_e$  und  $U_a = U_{R2} + U_{R1}$ . Aus diesen Aussagen kann nun die Verstärkung des Systems hergeleitet und berechnet werden.

$$V = \frac{U_a}{U_e} = \frac{U_{R1} + U_{R2}}{U_{R1}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$V = 1 + \frac{47k\Omega}{1k\Omega} = 48$$

Die berechnete Verstärkung passt mit den gemessenen Werten überein ( $U_e = 100mV$ ,  $U_a = 4,80V$ ).

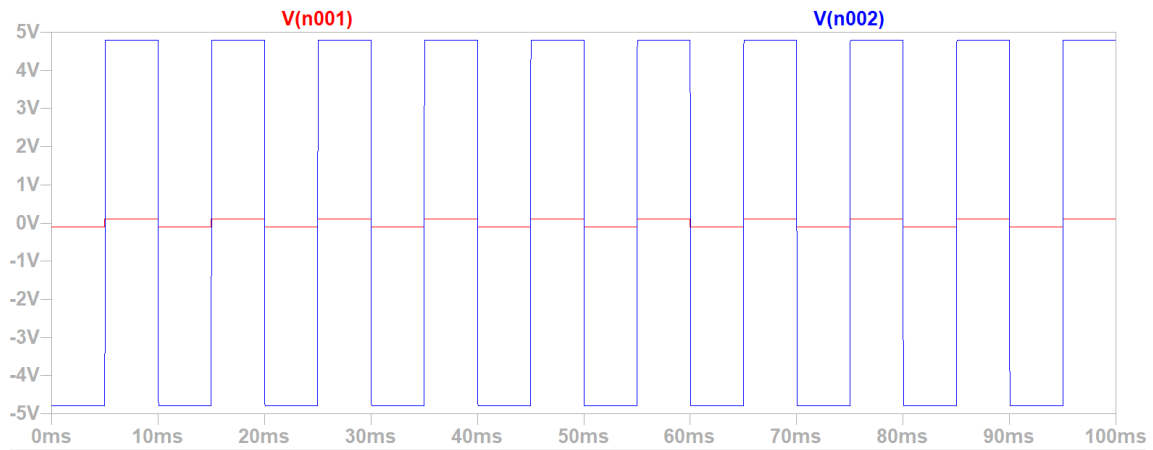


Figure 2: Nichtinvertierender Verstärker mit Rechtecksignal  $100\text{Hz}$ ; blau ... Ausgangsspannung  $U_a$ ; ... Eingangsspannung  $U_e$

Die Abbildung 2 zeigt Eingangs- und Ausgangsspannung ( $U_e$  und  $U_a$ ) des Nichtinvertierenden Verstärkers mit einem Rechtecksignal von  $100\text{Hz}$  und  $100\text{mV}$  Spannungsamplitude am Eingang. Die gemessene Amplitude der Ausgangsspannung von  $4,80\text{V}$  entspricht wieder der erwarteten Verstärkung von  $V = 48$ . Wie zu erkennen ist, sind Eingangs- und Ausgangsspannung phasengleich.

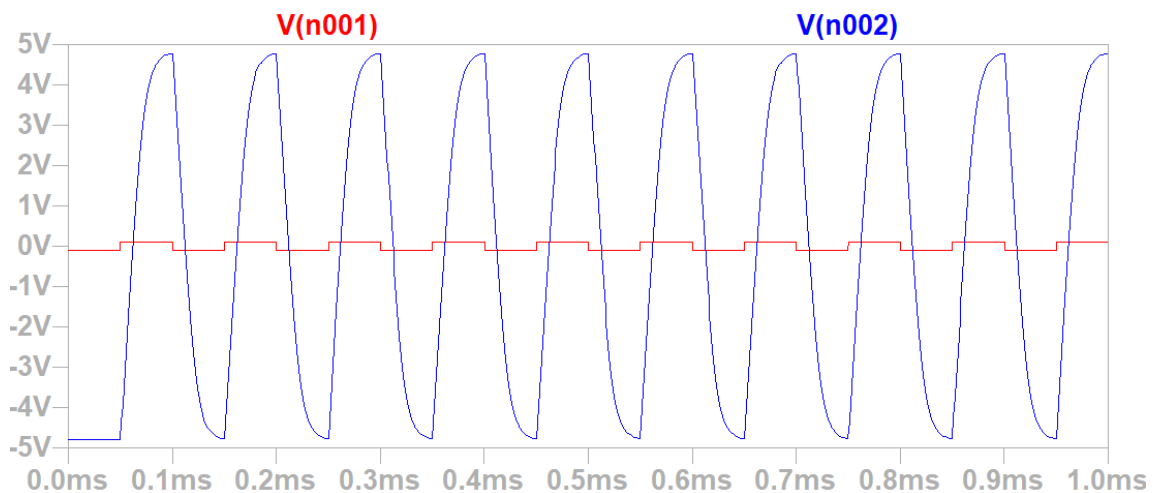


Figure 3: Nichtinvertierender Verstärker mit Rechtecksignal  $10\text{kHz}$ ; blau ... Ausgangsspannung  $U_a$ ; rot ... Eingangsspannung  $U_e$

Die Abbildung 2 zeigt Eingangs- und Ausgangsspannung ( $U_e$  und  $U_a$ ) des Nichtinvertierenden Verstärkers mit einem Rechtecksignal von  $10\text{kHz}$  und  $100\text{mV}$  Spannungsamplitude am Eingang. Die gemessene Amplitude der Ausgangsspannung von  $4,80\text{V}$  entspricht wieder erwarteten Verstärkung von  $V = 48$ . Aufgrund der inneren Kapazität des OPVs verhält sich das Ausgangssignal ähnlich wie ein Tiefpass 1.Ordnung (RC-Glied). Diese Kurvenform wird nur bei höherer Frequenz sichtbar.

## 2 Invertierender Verstärker

### 2.1 Aufgabenstellung

Das Verhalten eines OPV als invertierender Verstärker soll mittels LTSpice simuliert werden.

### 2.2 Schaltplan

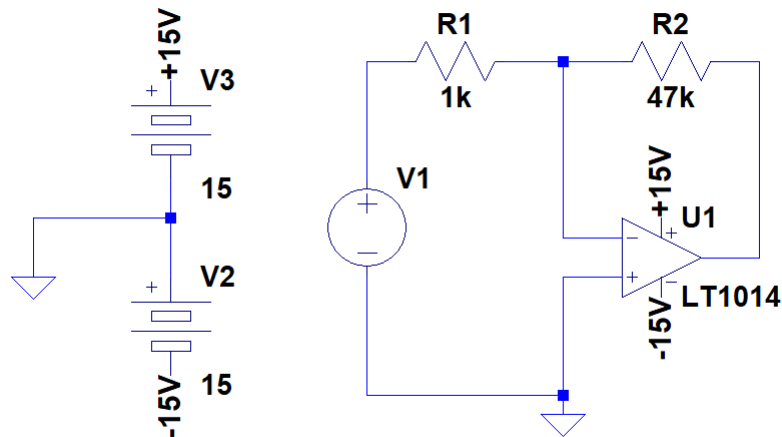


Figure 4: Invertierender Verstärker

### 2.3 Durchführung

Die Schaltung eines OPV als invertierender Verstärker wurde mit LTSpice aufgebaut (Abbildung 4). Die Spannungsverstärkung wird mit  $V_u = -\frac{R_2}{R_1}$  berechnet und soll zwischen  $-40$  und  $-60$  liegen. Das bedeutet  $R_2$  muss 40 bis 60 mal größer dimensioniert werden als  $R_1$ . Gewählt wurden die Widerstände  $R_1 = 1k\Omega$  und  $R_2 = 47k\Omega$ . Nun wurde das Verhalten des Systems mit einer DC Eingangsspannung bzw. mit Dreiecksignal mit Frequenz  $100Hz$  und  $10kHz$  simuliert. Weiters wurde der Frequenzbereich  $1Hz$  bis  $10MHz$  mit Sinussignal und  $V_{PP} = 0.1V$  simuliert und ein Bodediagramm geplottet. Die selbe Simulation sollte für die gleiche Schaltung mit einer Verstärkung von  $-4$  bis  $-6$  durchgeführt werden. Dazu wurden die Widerstände  $R_1 = 1k\Omega$  und  $R_2 = 4,7k\Omega$  gewählt, was eine Verstärkung von  $V_u = -\frac{4,7k\Omega}{1k\Omega} = -4,7$  ergibt. Die Diagramme und Ergebnisse sind im Abschnitt *Ergebnis & Diskussion* zu finden.

## 2.4 Ergebnis & Diskussion

Strom Widerstand $R_1$	$I_{R1}$	$100,00\mu A$
Strom Widerstand $R_2$	$I_{R2}$	$100,01\mu A$
Spannung Widerstand $R_1$	$U_{R1}$	$100,00mV$
Spannung Widerstand $R_2$	$U_{R2}$	$-4,70V$
Spannungsdifferenz Eingang OPV	$U_d$	$0,68\mu V$
Strom Eingang OPV	$I_d$	$12,02nA$
Eingangsspannung	$U_e$	$100mV$
Ausgangsspannung	$U_a$	$-4,70V$

Table 2: Messwerte Invertierender Verstärker bei DC 0,1V

In Abbildung 2 sind die Messwerte des OPVs als invertierender Verstärker mit einer Gleichspannung von  $100mV$  zu sehen. Grundsätzlich wäre die Verstärkung eines OPVs  $-\infty$  und die Verstärkung würde bei wenigen  $\mu V$  die positive bzw. negative Versorgungsspannung annehmen, und zwar jeweils negiert zur Spannung am invertierenden Eingang. Jedoch wird durch die Gegenkopplung (OPV Ausgang ist verbunden mit invertierenden Eingang) die Verstärkung durch die beiden Widerstände geregelt. Da ein OPV versucht die Spannungen an den Eingängen gleich zu halten und der nichtinvertierende Eingang mit Masse verbunden ist, hat man am invertierenden Eingang einen sog. virtuellen Nullpunkt. Da der Eingangswiderstand am OPV sehr groß (im Idealfall unendlich) ist, fließt kaum Strom zwischen den beiden Eingängen ( $12,02nA$ ). Da  $R_1$  einerseits mit der Spannungsquelle und andererseits mit dem virtuellen Nullpunkt (Masse) verbunden ist, kann man  $U_{R1}$  gleich  $U_e$  setzen. Aus dem gleichen Grund kann man  $U_{R1}$  gleich  $U_a$  setzen. Weiters kann man aufgrund der Knotenregel den Strom am  $R_1$  und  $R_2$  gleich setzen. Aus diesen Aussagen kann nun die Verstärkung des Systems hergeleitet werden.

$$V = -\frac{U_a}{U_e} = -\frac{U_{R2}}{U_{R1}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$V = -\frac{47k\Omega}{1k\Omega} = 47$$

Die berechnete Verstärkung passt mit den gemessenen Werten überein ( $U_e = 100mV$ ,  $U_a = -4,70V$ ).

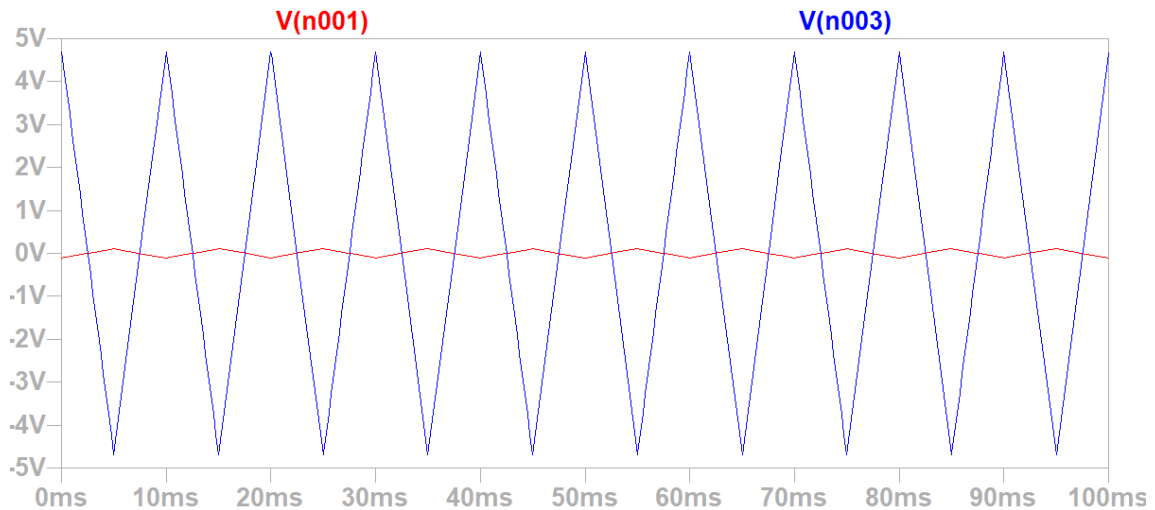


Figure 5: Invertierender Verstärker mit Dreiecksignal  $100\text{Hz}$ ; blau ... Ausgangsspannung  $U_a$ ; ... Eingangsspannung  $U_e$

Die Abbildung 5 zeigt die Eingangs- und Ausgangsspannung eines invertierenden Verstärkers mit Dreiecksignal ( $100\text{Hz}$ , Spannungsamplitude:  $0.1\text{V}$ ) am Eingang. Zu erkennen ist, dass die Verstärkung kontinuierlich  $V = -47$  beträgt. Die Amplitude des Ausgangssignals liegt daher bei  $4,7\text{V}$  bzw. bei  $-4,7\text{V}$ .

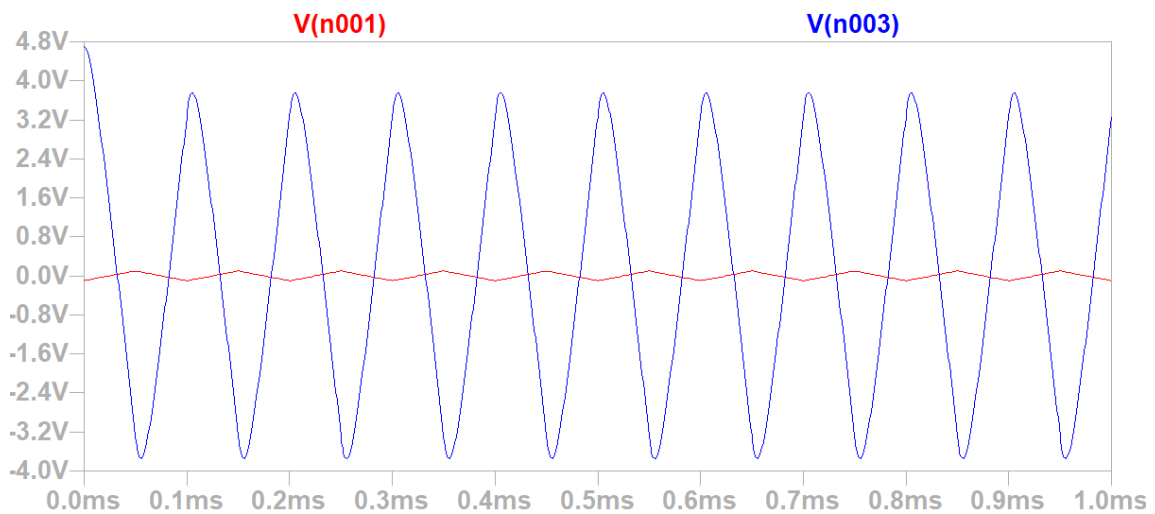


Figure 6: Invertierender Verstärker mit Dreiecksignal  $10\text{kHz}$ ; blau ... Ausgangsspannung  $U_a$ ; rot ... Eingangsspannung  $U_e$

Die Abbildung 6 zeigt die Eingangs- und Ausgangsspannung eines invertierenden Verstärkers mit Dreiecksignal ( $10\text{kHz}$ , Spannungsamplitude:  $0.1\text{V}$ ) am Eingang. Aufgrund der inneren Kapazität des OPVs verhält sich der Ausgang ähnlich wie ein RC-Tiefpassfilter und die Ausgangsspannung ändert sich verzögert zur Eingangsspannung. Durch die höhere Frequenz ( $10\text{kHz}$ ) wird die vollständige Verstärkung von  $-47$  nicht mehr erreicht.



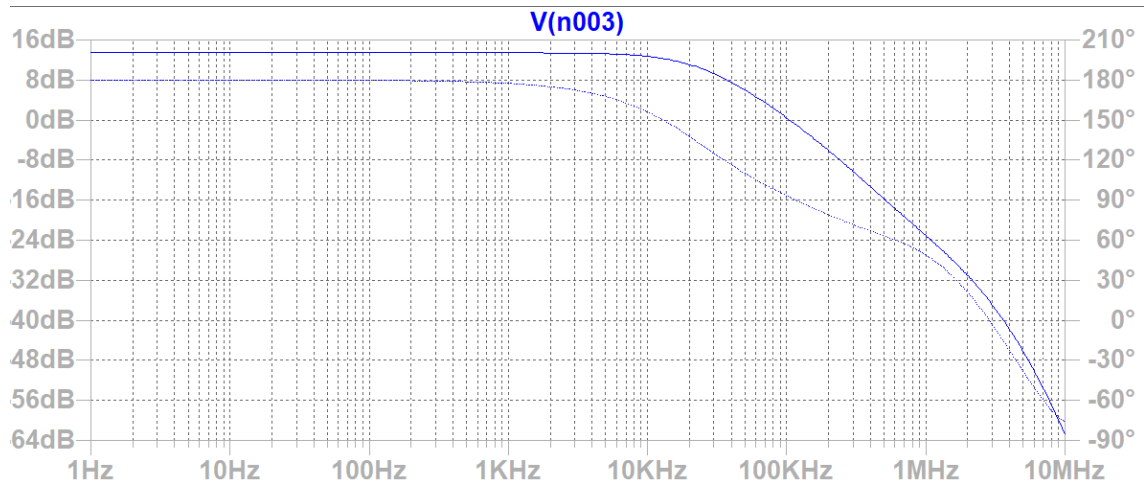


Figure 7: Invertierender Verstärker Bodediagramm; Widerstandsverhältnis: 47 : 1

In den Abbildungen 7 sind Amplituden- und Phasengang eines invertierenden Verstärkers mit Sinussignal am Eingang zu sehen. Die Frequenzen von  $1\text{Hz}$  bis  $10\text{MHz}$  wurden simuliert. Die Abbildung 7 zeigt das Verhalten des invertierenden Verstärkers bei einem Widerstandsverhältnis von 47 : 1. Eine Ähnlichkeit des Bodediagramms zu einem Tiefpassfilter ist zu sehen. Bis zur Grenzfrequenz wurde eine konstante Verstärkung von  $13,44\text{dB}$  gemessen. Die Grenzfrequenz wurde bei der Verstärkung von  $13,44\text{dB} - 3\text{dB} = 10,44\text{dB}$  gemessen und beträgt rund  $23,44\text{kHz}$ . Danach fällt der Amplitudengang mit  $-20\text{dB/Dekade}$  und dann sogar mit  $-40\text{dB/Dekade}$  ab. Die Transitfrequenz, also der Punkt mit  $0\text{dB}$  Verstärkung, wurde bei einer Frequenz von rund  $102\text{kHz}$  gemessen.

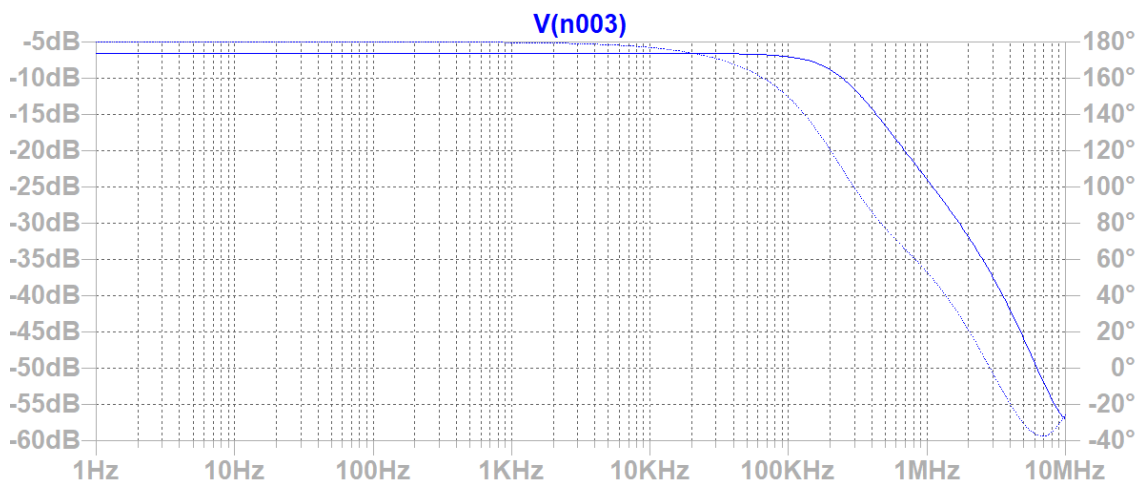


Figure 8: Invertierender Verstärker Bodediagramm; Widerstandsverhältnis: 4,7 : 1

In den Abbildungen 8 sind Amplituden- und Phasengang eines invertierenden Verstärkers mit Sinussignal am Eingang zu sehen. Die Frequenzen von  $1\text{Hz}$  bis  $10\text{MHz}$  wurden simuliert. Die Abbildung 7 zeigt das Verhalten des invertierenden Verstärkers bei einem

Widerstandsverhältnis von 4,7 : 1. Eine Ähnlichkeit des Bodediagramms zu einem Tiefpassfilter ist zu sehen. Bis zur Grenzfrequenz wurde eine konstante Dämpfung von rund  $-6,55\text{dB}$  gemessen. Die Grenzfrequenz wurde bei  $-6,55\text{dB} - 3\text{dB} = -9,55\text{dB}$  gemessen und beträgt rund  $229\text{kHz}$ .

## 3 Integrierer

### 3.1 Aufgabenstellung

Das Verhalten eines Integrierers soll im Zeit- und Frequenzbereich simuliert werden.

### 3.2 Schaltplan

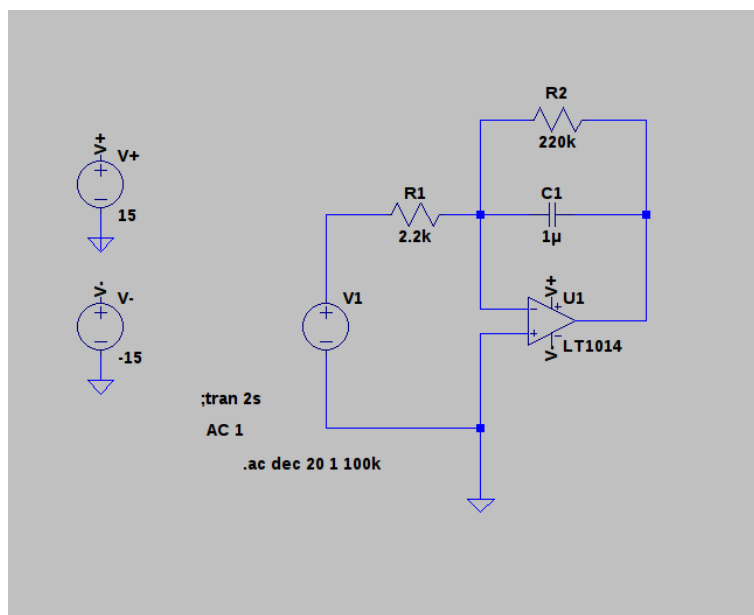


Figure 9: Integrierer

### 3.3 Durchführung

Die Schaltung wurde gemäß Angabe zusammengefügt. Die Versorgungsspannung des OPV (LT1014) beträgt  $\pm 15\text{V}$ . Um das Verhalten im Zeitbereich zu simulieren, wurde eine Rechteckspannung mit  $f = 5\text{Hz}$ ,  $A = \pm 0,1\text{V}$ ,  $V_{\text{initial}} = -0,1\text{V}$  angelegt. Das Zeitverhalten wurde im Bereich von 0 bis  $2\text{s}$  aufgezeichnet. Zur Simulation des Frequenzverhaltens wurde eine Sinusspannung mit  $1V_{\text{pp}}$  angelegt und das Bode-Diagramm von  $1\text{Hz} - 100\text{kHz}$  aufgezeichnet.

### 3.4 Ergebnis & Diskussion

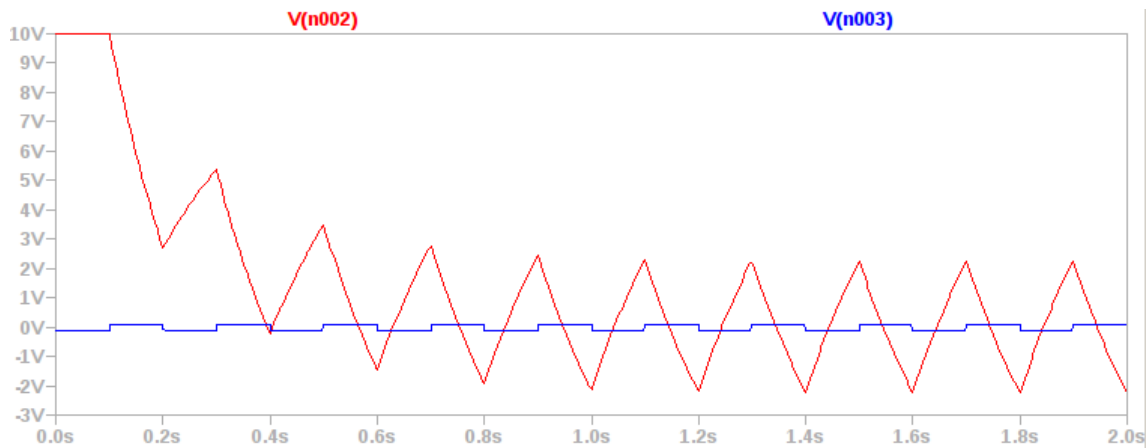


Figure 10: Zeitverhalten (rot ... Ausgangsspannung, blau ... Eingangsspannung)

Im Bereich von 0 bis 1s ist ein Einschwingvorgang zu erkennen, welcher auf das  $RC$ -Glied zurückzuführen ist. Da die Differenz der beiden OPV-Eingänge zu Beginn  $-0,1V$  beträgt, übersteuert der OPV, die Differenz schlägt auf  $0,1V$  um und der OPV versucht zu untersteuern, dann pendelt sich das Signal ein. Im eingeschwungenen Zustand wird das anliegende Rechtecksignal gemäß der Übertragungsfunktion

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

zu einem Dreieckssignal mit

$$U_e < 0 : U_a = \frac{t}{10 \cdot RC} \approx 45,5 \cdot t, U_e > 0 : U_a = -\frac{t}{10 \cdot RC} \approx -45,5 \cdot t$$

integriert. TODO: Anfangsbedingung,  $V_{pp}$ !!!

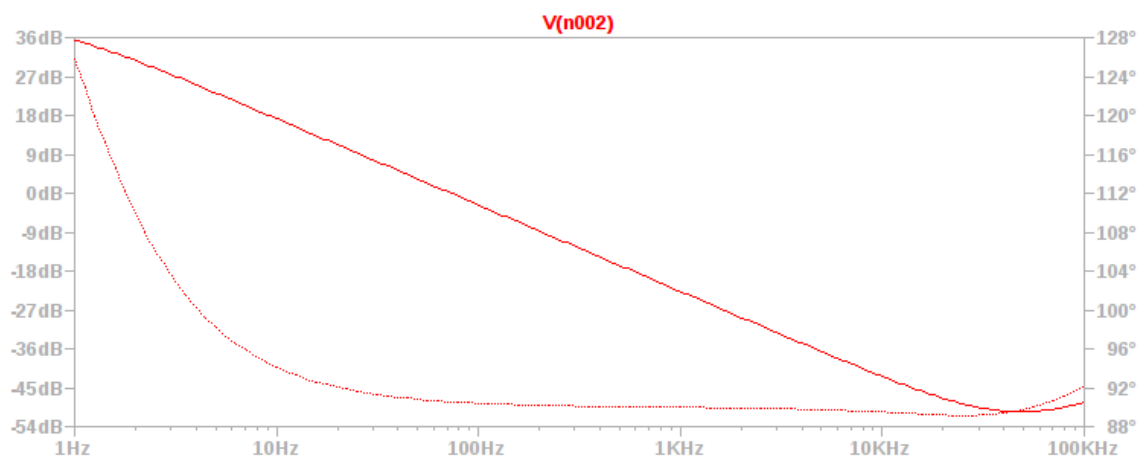


Figure 11: Bode-Diagramm

Am Frequenzverhalten kann man erkennen, dass das System bis zur Grenzfrequenz des  $RC$ -Glieds ( $f_g = \frac{1}{2\pi RC} \approx 72Hz$ ) verstärkend wirkt und danach zu Dämpfen beginnt. Die Filtersteilheit beträgt  $-20dB/Dekade$ . Die Phase dreht zuerst sehr stark, dann immer schwächer von  $126^\circ$  auf  $90^\circ$ . Im Bereich über  $40kHz$  beginnt die Phasenverschiebung wieder zu steigen und die Dämpfung wird schwächer.

TODO: grober Unfug?

## 4 Invertierender Schmitt-Trigger

### 4.1 Aufgabenstellung

Das Verhalten eines invertierenden Schmitt-Triggers soll im Zeitbereich simuliert werden.

### 4.2 Schaltplan

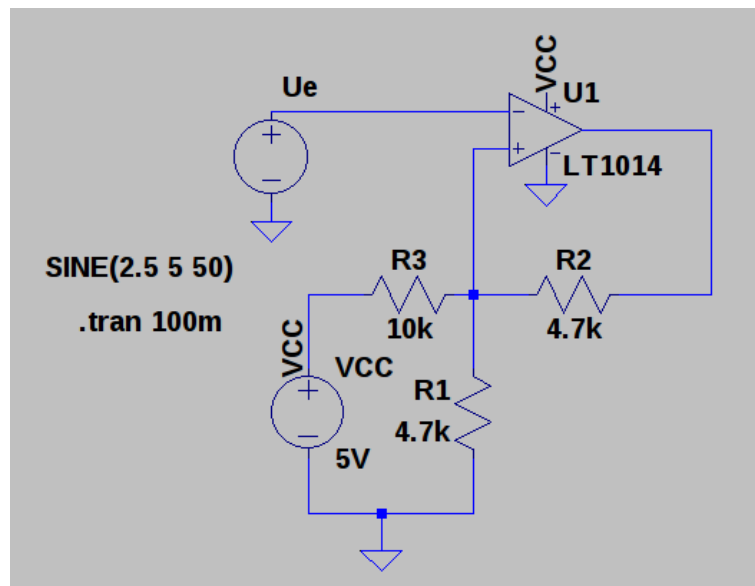


Figure 12: Invertierender Schmitt-Trigger

### 4.3 Durchführung

Die Schaltung wurde gemäß Angabe zusammengefügt. Die Versorgungsspannung des OPV (LT1014) beträgt  $V_+ = 5V, V_- = 0V$ . Zuerst wurde die Aus- und Eingangsspannung, sowie die Spannung am positiven Eingang des OPV im Bereich von 0 bis  $100ms$  mit einem Sinus-Eingangssignal ( $DC_{offset} = 2,5V, V_{pp} = 5V, f = 50Hz$ ) simuliert. Dann wurde das Zeitverhalten mit einem Dreieckssignal ( $V_{on} = 5V, V_{off} = 0V, f = 5MHz$ ) von 0 bis  $1\mu s$  simuliert.

## 4.4 Ergebnis & Diskussion

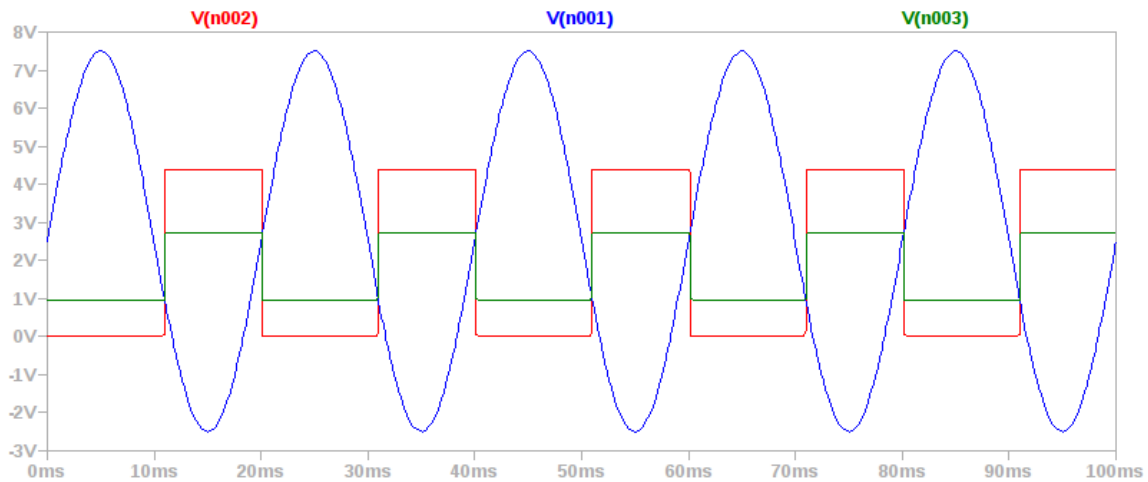


Figure 13: Zeitverhalten bei Sinussignal (rot ... Ausgangsspannung, blau ... Eingangsspannung, grün ... Spannung am positiven OPV Eingang)

Berechnung der Spannung am positiven OPV Eingang mittels Superpositionsprinzip:

- $U_{low} = 0,029V$  (abgelesen):  
 $U_a$  kurzgeschlossen:  

$$U_{p1} = U_{VCC} \frac{R_{12}}{R_{12}+R_3} = U_{VCC} \frac{\frac{R_1 R_2}{R_1+R_2}}{\frac{R_1 R_2}{R_1+R_2}+R_3} = 5V \frac{2,35k\Omega}{2,35k\Omega+10k\Omega} \approx 0,95V$$
 $U_{VCC}$  kurzgeschlossen:  

$$U_{p2} = U_{low} \frac{R_{13}}{R_{13}+R_2} = U_{low} \frac{\frac{R_1 R_3}{R_1+R_3}}{\frac{R_1 R_3}{R_1+R_3}+R_2} = 0,029V \frac{3,19k\Omega}{3,19k\Omega+4,7k\Omega} \approx 0,01V$$

$$U_p = U_{p1} + U_{p2} \approx 0,96V$$
- $U_{high} = 4,39V$  (abgelesen):  
 $U_a$  kurzgeschlossen:  

$$U_{p1} = U_{VCC} \frac{R_{12}}{R_{12}+R_3} = U_{VCC} \frac{\frac{R_1 R_2}{R_1+R_2}}{\frac{R_1 R_2}{R_1+R_2}+R_3} = 5V \frac{2,35k\Omega}{2,35k\Omega+10k\Omega} \approx 0,95V$$
 $U_{VCC}$  kurzgeschlossen:  

$$U_{p2} = U_{high} \frac{R_{13}}{R_{13}+R_2} = U_{high} \frac{\frac{R_1 R_3}{R_1+R_3}}{\frac{R_1 R_3}{R_1+R_3}+R_2} = 4,39V \frac{3,19k\Omega}{3,19k\Omega+4,7k\Omega} \approx 1,78V$$

$$U_p = U_{p1} + U_{p2} \approx 2,73V$$

Die Spannung am positiven Eingang des OPV bestimmt (wie auch im Diagramm ersichtlich), wann getriggert wird. Das heißt, wenn das Sinussignal am Eingang unter  $0,95V$  fällt, liefert der OPV am Ausgang  $U_{high}$ , wenn das Eingangssignal  $2,73V$  übersteigt, liegt am Ausgang  $U_{low}$  an. Somit wandelt der Schmitt-Trigger das Sinussignal in ein invertiertes Rechtecksignal um.

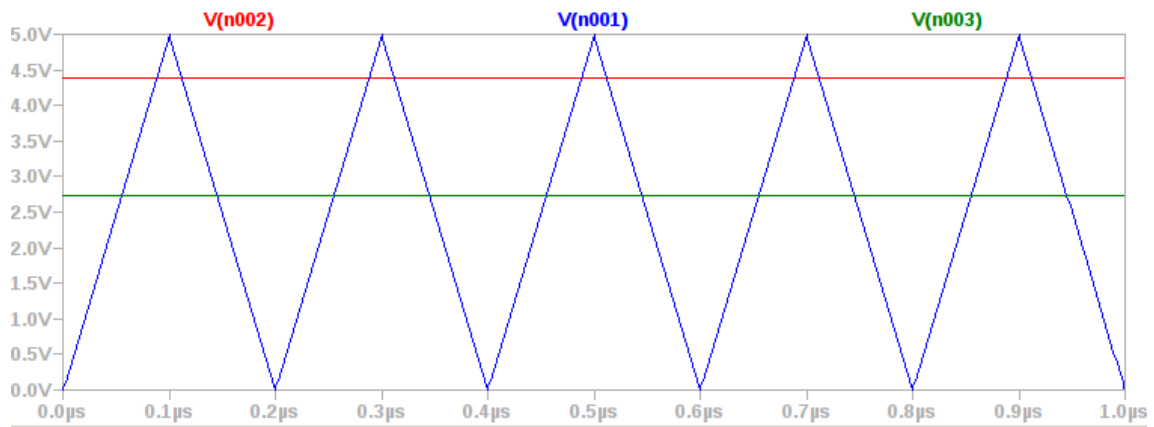


Figure 14: Zeitverhalten bei  $5\text{MHz}$  Dreieckssignal (rot ... Ausgangsspannung, blau ... Eingangsspannung, grün ... Spannung am positiven OPV Eingang)

Durch die hohe Frequenz des Eingangssignals wird der verwendete OPV an seine Grenzen getrieben und kann nicht mehr schnell genug schalten. Das gewünschte Schmitt-Trigger-Verhalten ist nicht mehr zu erkennen.

