



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Elektrotechnische Grundlagen der Informatik (LU 182.692)

Protokoll der 3. Laborübung: „Operationsverstärker“ a) LTSPICE-Simulationen

Gruppennr.: 10

Datum der Laborübung: 01.06.2017

Matr. Nr.	Kennzahl	Name
1609418	033 535	GEISELBRECHTINGER Max
1625753	033 535	HAAR Martin

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

Inhaltsverzeichnis

1	Nichtinvertierender Verstärker	3
2	Invertierender Verstärker	6
3	Integrierer	11
4	Invertierender Schmitt-Trigger	14

1 Nichtinvertierender Verstärker

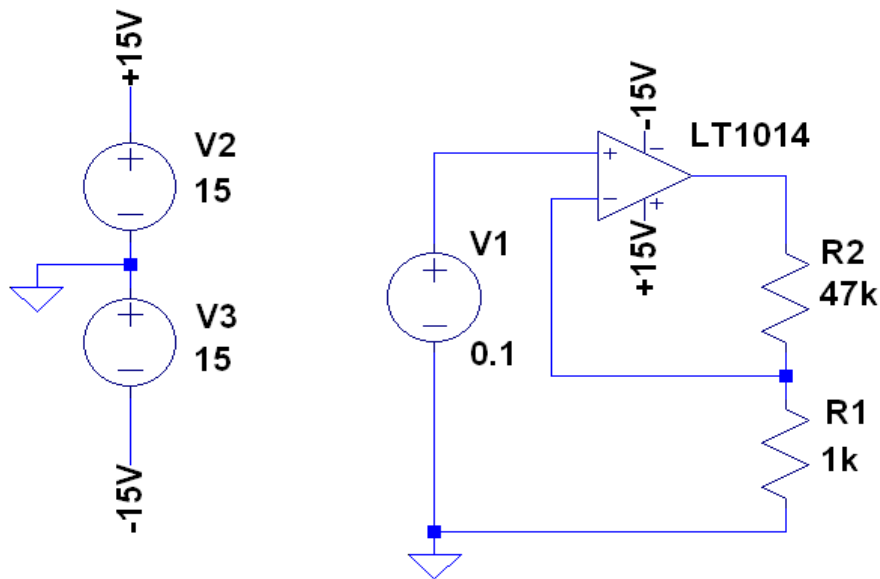


Abbildung 1: Operationsverstärker beschaltet

Die Widerstände wurden im $k\Omega$ -Bereich gewählt, um die den Messfehler der Messgeräte möglichst gering zu halten. Die Verstärkung des Operationsverstärker setzt sich aus dem Verhältniss der beiden Widerstände zusammen, $V_u = 1 + \frac{47k\Omega}{1k\Omega} = 48$, daraus ergeben sich folgende Messwerte.

U_e	0,1V
U_a	4,79V
U_{R1}	0,1V
U_{in+}	0,1V
U_{in-}	0,99V
I_{R1}	0,1mA
I_{R2}	0,1mA
I_{in+}	0mA
I_{in-}	0mA

Abbildung 2: Simulierte Daten

Die Messdaten der Simulation zeigen die zuvor berechnete 48fache Verstärkung der Ausgangsspannung, sowie nahezu keinen Potentialunterschied zwischen den Steuereingängen. Daher ist auch die Spannung die am Widerstand R_1 abfällt gleich der Eingangsspannung. An den Eingängen des Operationsverstärkers fließt kein Strom, da er sehr hohe Innenwiderstände besitzt. Dadurch zweigt auch kein Strom im Knotenpunkt zwischen den beiden Widerständen

ab. Dies erlaubt es, die Ausgangsspannung über die Spannungsteilerregel zu berechnen.

$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$
$$U_a = U_e \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

1.1 Frequenzverhalten

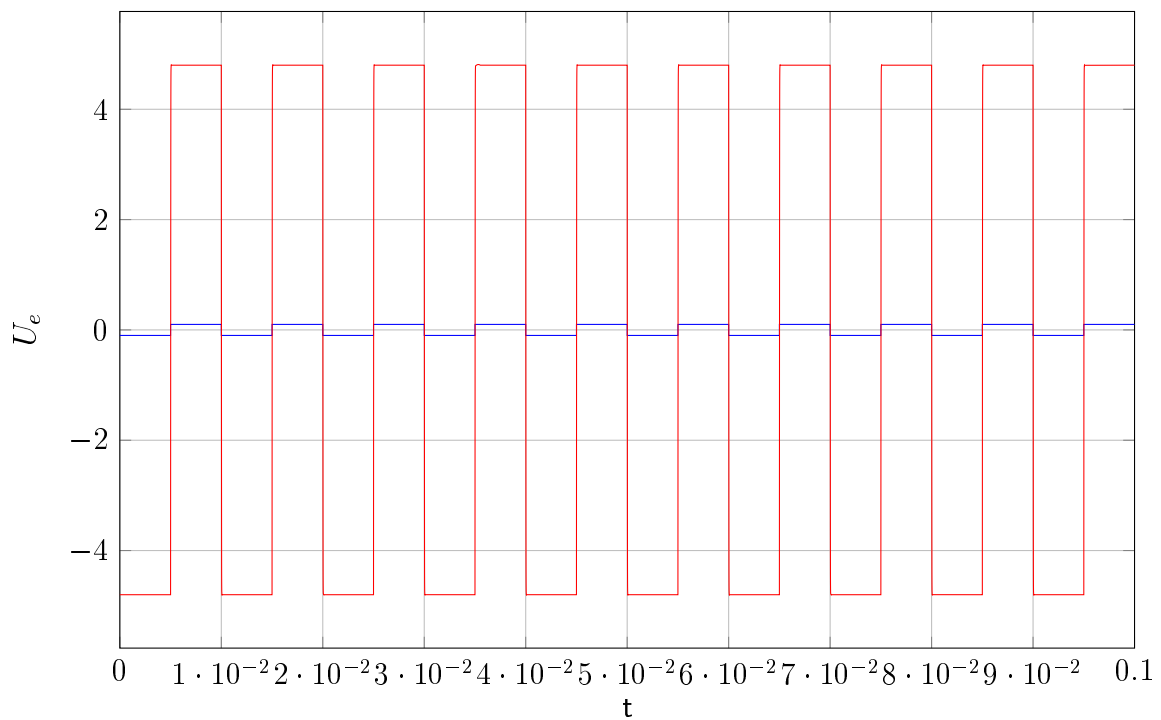


Abbildung 3: symmetrisches Rechtecksignal, $V_{PP} = 0.2V$, $f = 100Hz$

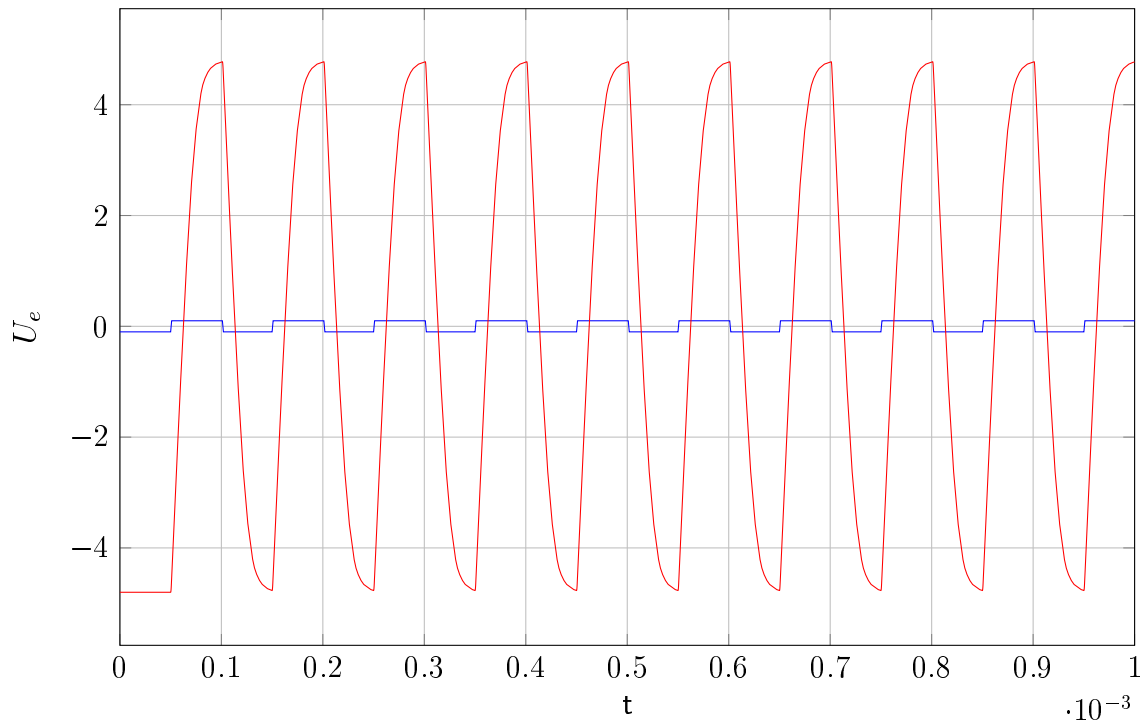


Abbildung 4: symmetrisches Rechtecksignal, $V_{PP} = 0.2V$, $f = 10kHz$

Der Operationsverstärker besitzt auf Grund seiner Bauweise ein Tiefpassfilter-Verhalten 1.Ordnung. Dies führt dazu, dass die Verstärkung ab einer Grenzfrequenz, von ca. $1kHz$, mit $20db/DEK$ abnimmt. Bei einer Transitfrequenz von ca. $10MHz$ ist keine Verstärkung mehr vorhanden.

Dies kann man gut an den beiden Simulationen erkennen. In der zweiten Simulation sieht man, wie der interne Kondensator bei hohen Frequenzen das Signal beeinflusst.

2 Invertierender Verstärker

2.1 Simulationsschaltung

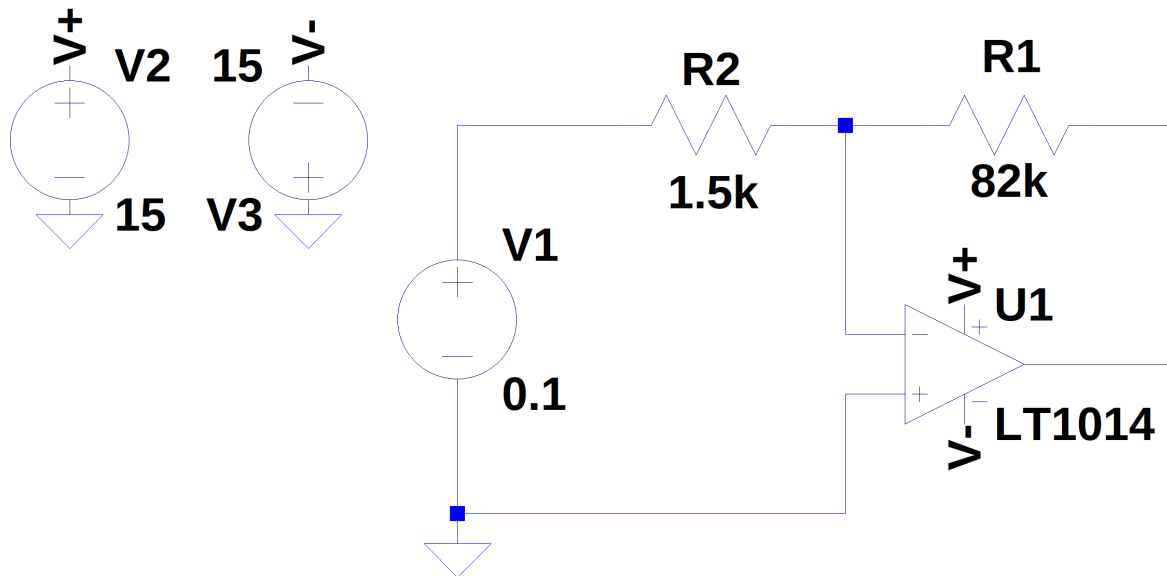


Abbildung 5: Simulationsschaltung

Da es sich bei dieser Schaltung um einen invertierenden Verstärker handelt, wird die Eingangsspannung an den invertierenden Eingang des OPV geschaltet. Der Ausgang wird ebenfalls auf den invertierenden Eingang gegengekoppelt, um eine brauchbare Verstärkung einstellen zu können. Ein Idealer OPV ohne Gegenkopplung würde die Differenzspannung zwischen invertierenden und nicht-invertierenden Eingang ∞ verstärken. Die Verstärkung wird mit den beiden Widerständen R_1 und R_2 eingestellt. Die beiden Spannungsquellen V_2 und V_3 stellen die symmetrische Versorgungsspannung von $-15V$ bis $+15V$ dar.

$$\frac{U_e}{U_a} = -\frac{R_1}{R_2} \Rightarrow U_a = -U_e * \frac{R_2}{R_1} \Rightarrow V = -\frac{R_2}{R_1}$$

Da sich die Verstärkung V laut Angabe zwischen -40 und -60 befinden soll wurden für die Widerstände folgende Werte gewählt:

$$R_1 = 82k\Omega$$

$$R_2 = 1,5k\Omega$$

$$V = -\frac{82k\Omega}{1,5k\Omega} = -54,7$$

2.2 Ströme und Spannungen

Am Eingang des invertierenden Verstärkers wurde wie in der Simulationsschaltung eine Spannungsquelle mit $100mV$ angeschlossen.

U_e	$100mV$		
U_a	$-5,47V$		
U_{R_1}	$-5,47V$	I_{R_2}	$-66,68\mu A$
U_{R_2}	$100mV$	I_{R_1}	$-66,68\mu A$
U_{IN-}	$786nV$	I_{IN-}	$-12nA$
U_{IN+}	$0V$	I_{IN+}	$0A$

Abbildung 6: Spannungen und Ströme

Die Ausgangsspannung U_a ergibt sich aus $U_e * V$, in diesem Fall $-5,47V$. Der nicht invertierende Eingang ist auf Masse geschaltet, da ein OPV immer Versucht die Spannung an beiden Eingängen gleich zu halten, befindet sich am invertierenden Eingang die sogenannte "virtuelle Masse". Daraus folgt wiederum, dass an dem Widerstand R_2 die $100mV$ der Eingangs- und an R_1 die $-5,47V$ der Ausgangsspannung abfallen.

Da der Eingang eines OPV sehr hochohmig ist (ideal: $R_{in} = \infty$) fließt auch kein Strom hinein, daraus folgt wiederum dass die Ströme durch R_1 und R_2 gleich sein müssen.

2.3 Zeitbereich

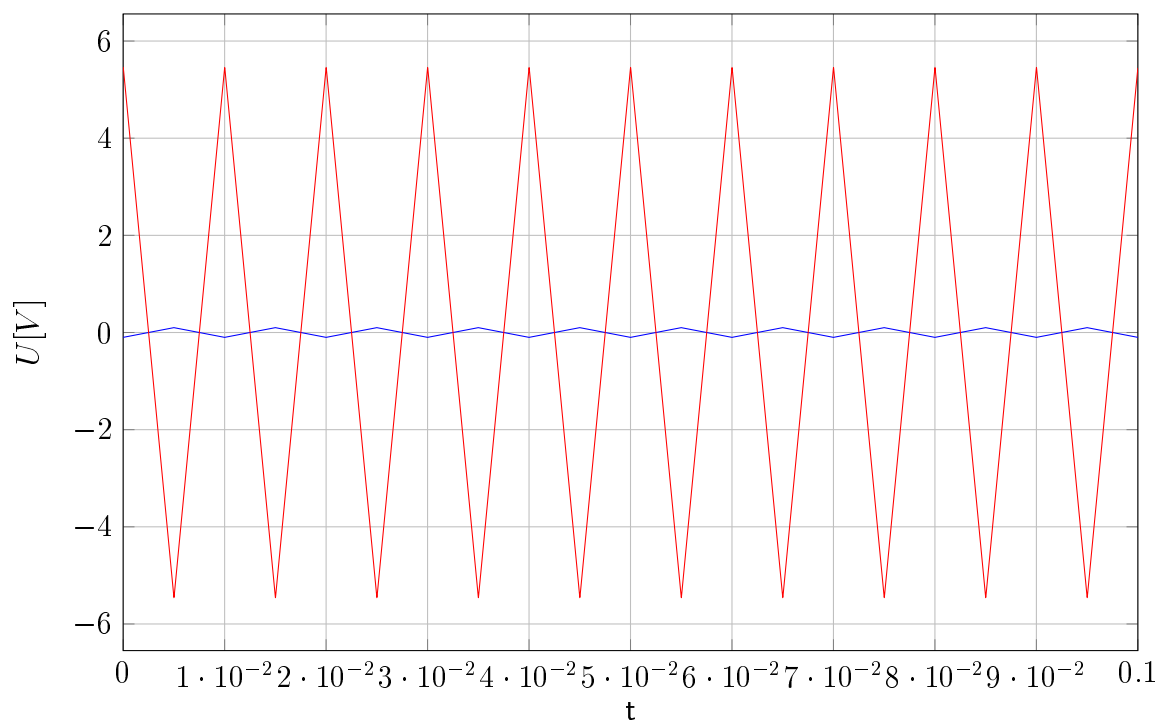


Abbildung 7: symmetrisches Dreieck, $V_{PP} = 0.1V$, $f = 100Hz$

In dieser Simulation ist ein schönes Verstärkerverhalten zu erkennen. Das Eingangssignal, mit einer Amplitude von $V_{PP} = 100mV$, wird mit der zuvor errechneten Verstärkung von $V = -54,7$ verstärkt und am Ausgang des OPV ausgegeben.

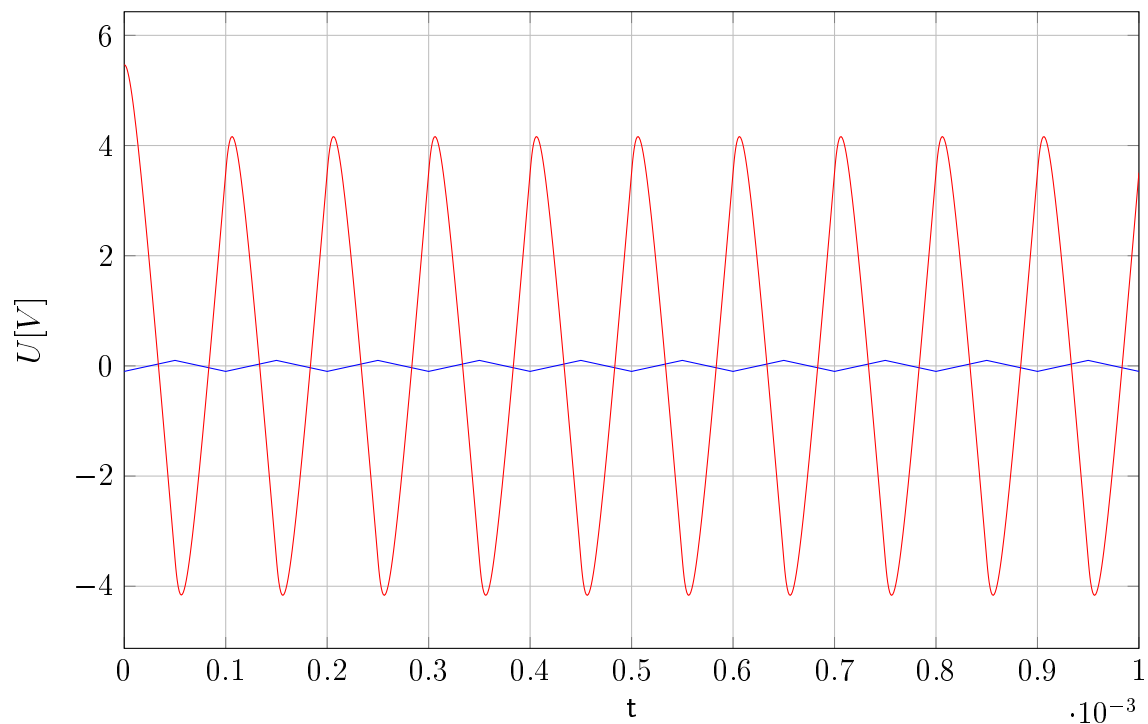


Abbildung 8: symmetrisches Dreieck, $V_{PP} = 0.1V$, $f = 10kHz$

Ein realer OPV verhält sich intern ähnlich wie ein Tiefpassfilter, je höher die Frequenz desto geringer wird die Verstärkung. Dies ist in dieser Simulation sehr gut zu erkennen, das Ausgangssignal ist im Vergleich zu der vorherigen Messung verschliffen und wird nicht mehr so gut verstärkt.

2.4 Bodediagramme

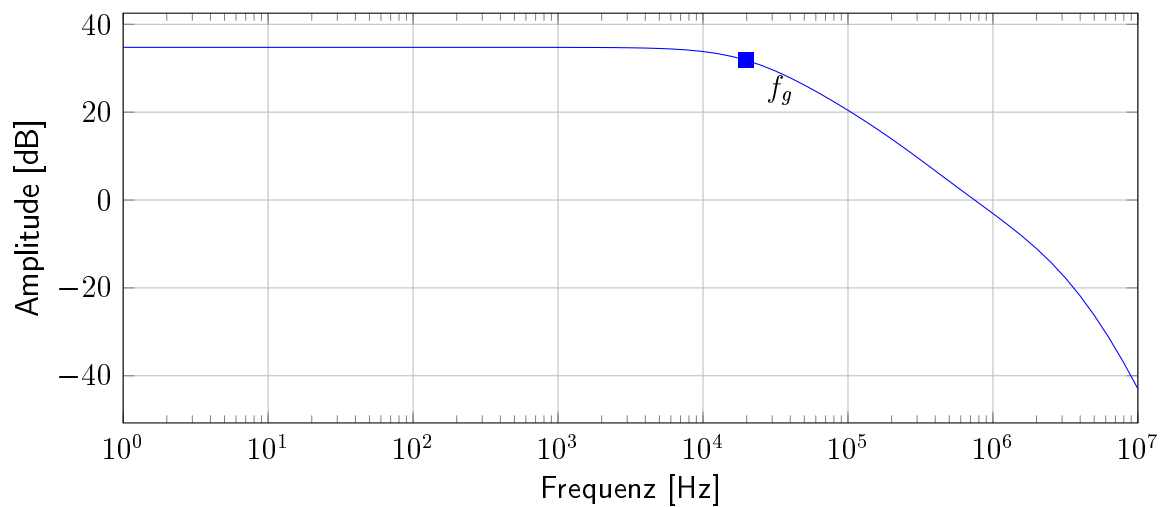


Abbildung 9: Amplitudengang, $V = -54,7$

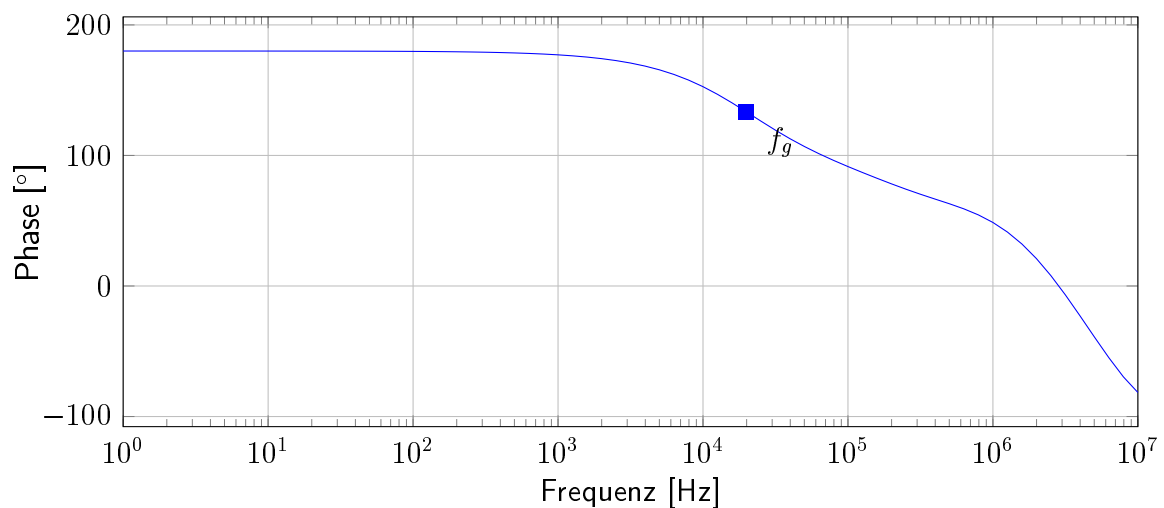


Abbildung 10: Phasengang, $V = -54,7$

Das zuvor erwähnte Tiefpassverhalten spiegelt sich in dem Bodediagramm wieder. Ab einer Grenzfrequenz von etwa 20 kHz wird die Verstärkung dieser Schaltung weniger und fällt zunächst mit -20 dB/Dec , dies steigt letztlich sogar auf -40 dB/Dec an. Bis zur Grenzfrequenz des beschalteten OPVs, wird mit 34 dB verstärkt, dies entspricht dem zuvor berechneten Faktor von 54. Die Transitfrequenz befindet sich bei ca. 1 MHz , ab dieser beginnt der OPV zu dämpfen.

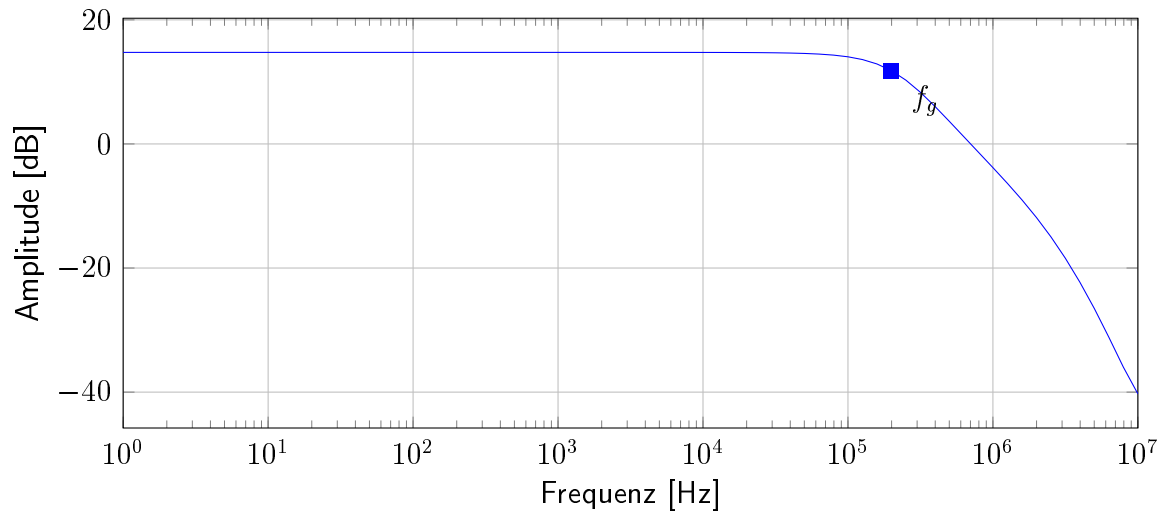


Abbildung 11: Amplitudengang, $V = -5,47$

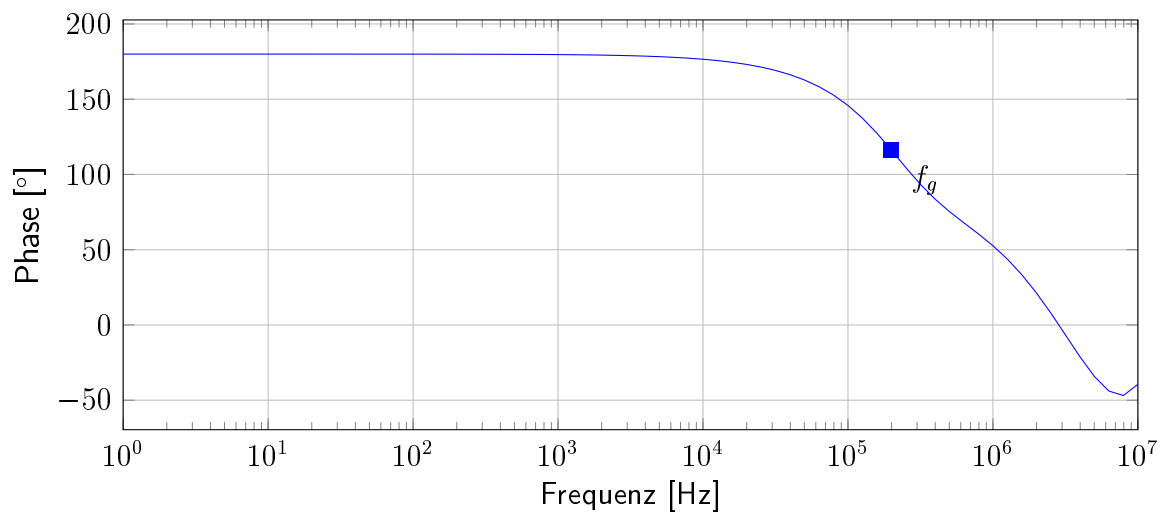


Abbildung 12: Phasengang, $V = -5,47$

Bei diesem Bodediagramm wurde die Verstärkung von $V = -54,7$ auf $V = -5,47$ verringert, dies erfolgte durch eine Verringerung von R_1 auf $8,2k\Omega$. Durch das Ändern der Schaltungseigenschaften verschiebt sich die Grenzfrequenz des OPV nach hinten. Anstatt bereits bei $20kHz$ beginnt die Dämpfung bei dieser Schaltung erst ungefähr eine Dekade später bei etwa $200kHz$. Die Transitfrequenz bleibt unverändert bei ca. $1MHz$.

3 Integrierer

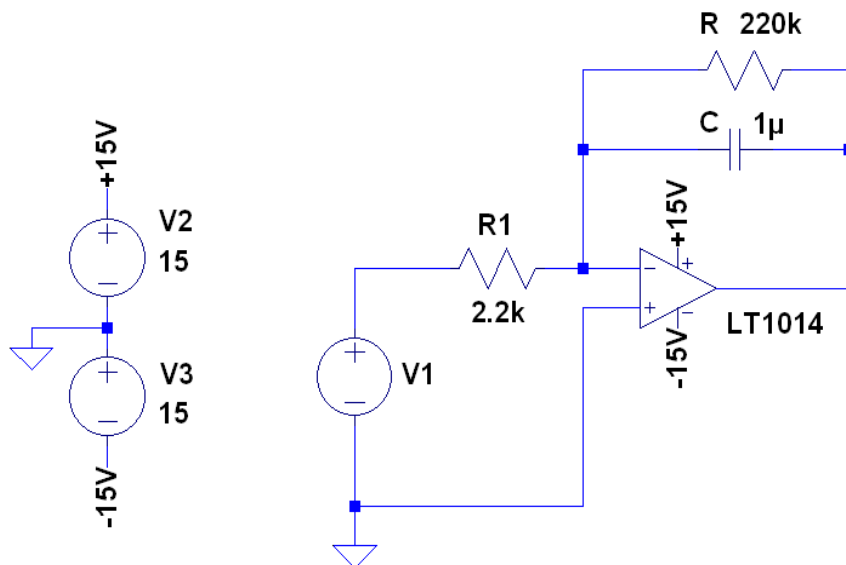


Abbildung 13: Operationsverstärker als Integrator beschaltet

In dieser Beschaltung gibt die Ausgangsspannung das Integral der Eingangsspannung über die Zeit an. Der Widerstand R dient nur zur Stabilisation der Schaltung und wird daher in den Berechnungen vernachlässigt, er sollte jedoch wesentlich größer als R_1 gewählt werden.

3.1 Übertragungsfunktion

Der invertierende Integrierer ist vom Aufbau ähnlich dem invertierenden Verstärker, jedoch wird die Ausgangsspannung hier durch die Spannung am Kondensator beschrieben.

$$\begin{aligned}
 U_C &= \frac{1}{C} \int i_c(t) \, dt \\
 i_c &= I_{R1} \\
 U_C &= \frac{1}{RC} \int U_e(t) \, dt \\
 U_a &= -U_C
 \end{aligned}$$

Aus dieser Berechnung ergibt sich für das Eingangssignal, in Form einer Rechteckspannung mit fallender Flanke, eine Dreiecksspannung mit steigender Flanke.

$$RC = 2,2ms$$

$$U_e(t) = \begin{cases} -\frac{1}{10} & 0 \leq t < 100ms \\ \frac{1}{10} & 100ms < t \leq 200ms \end{cases} \quad U_a(t) = \begin{cases} \frac{t}{22} & 0 \leq t < 100ms \\ -\frac{t}{22} & 100ms < t \leq 200ms \end{cases}$$

Dieses Ergebnis kann man, nach dem Einschwingvorgang, auch in der Simulation beobachten.

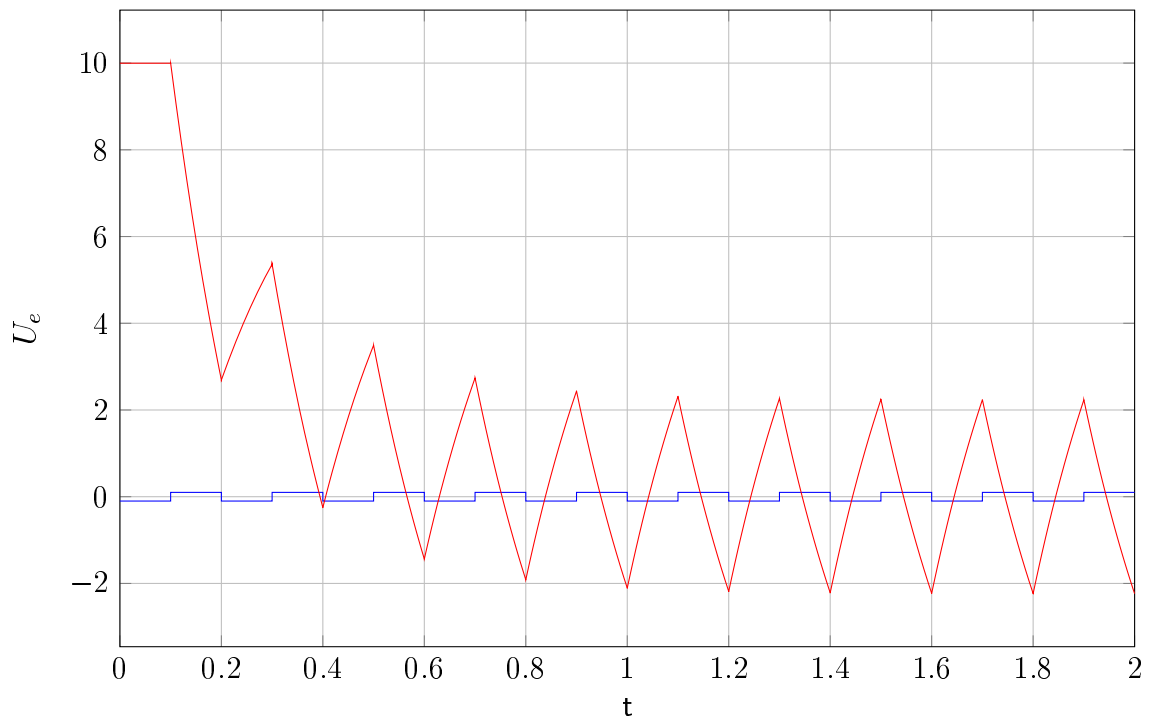


Abbildung 14: U_e symmetrisches Rechtecksignal, $V_{PP} = 0.2V$, $f = 5Hz$

3.2 Bode-Diagramm

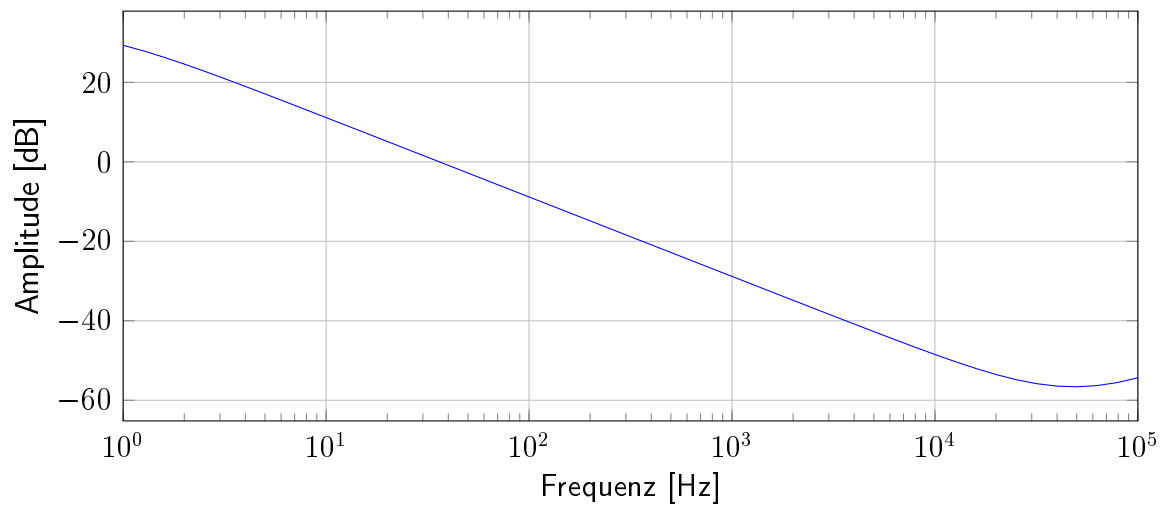


Abbildung 15: Amplitudengang

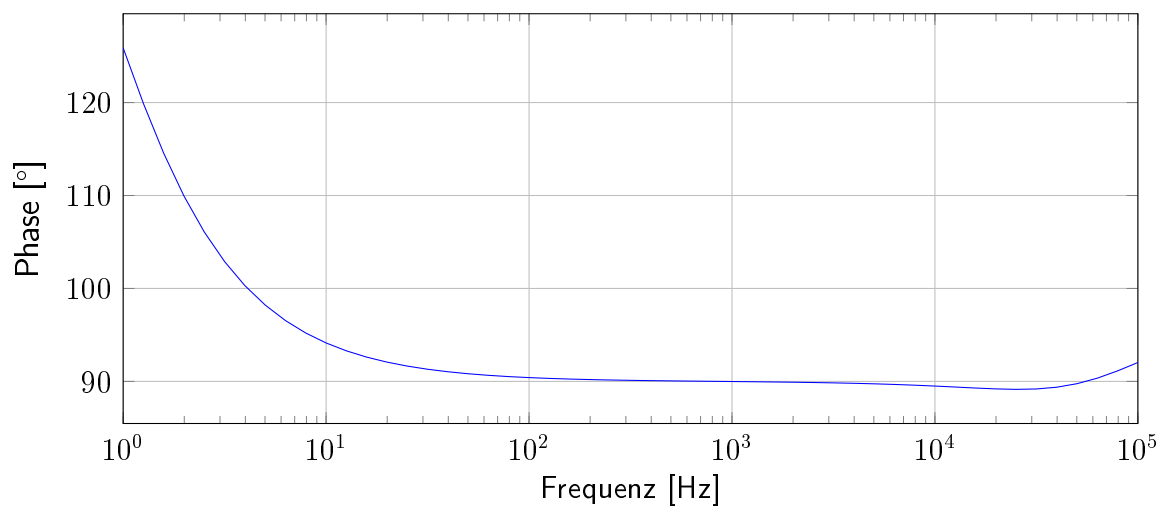


Abbildung 16: Phasengang

Das Bode-Diagramm zeigt die Abnahme der Verstärkung bei steigender Frequenz, mit 20dB/DEK . Die Transitfrequenz liegt bei dieser OPV-Schaltung bei ca. 30Hz , danach wirkt er dämpfend.

4 Invertierender Schmitt-Trigger

4.1 Simulationsschaltung

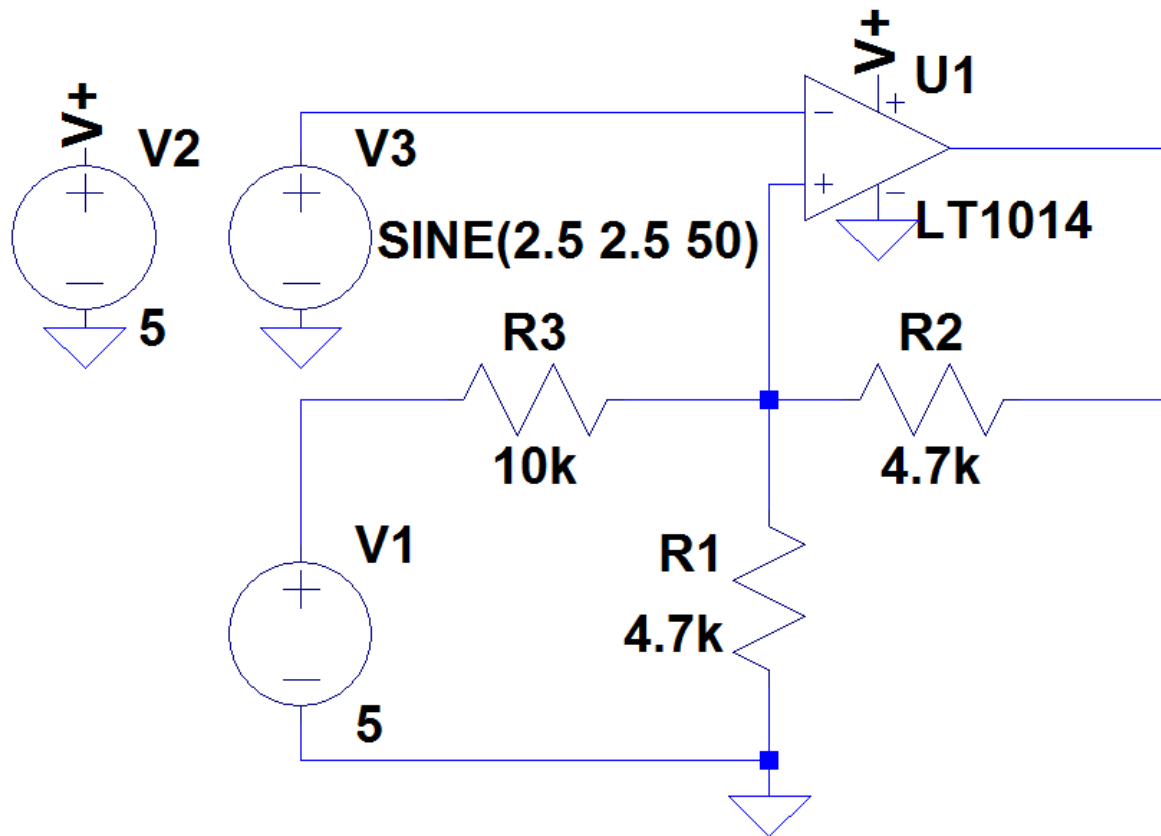


Abbildung 17: Simulationsschaltung

Da das Eingangssignal an den invertierenden Eingang geschaltet ist, ist diese OPV Schaltung auf jeden Fall invertierend. Die Ausgangsspannung wird auf den nicht-invertierenden Eingang rückgekoppelt, das heißt es handelt sich um eine Mittkopplung, das heißt der OPV wird bei jedem Eingangssignal entweder nach oben oder nach unten übersteuern.

4.2 Berechnung Superpositionsprinzip

$$U_{high} = 4,39V$$

$$U_{low} = 0,029V$$

$$R_{12} = 2,35k\Omega$$

$$R_{13} = 3,19k\Omega$$

- **1. Fall:** U_{high}

Kurzgeschlossen: U_a

$$U_{p1} = U_{VCC} * \frac{R_{12}}{R_{12}+R_3} = 5V * \frac{2,35}{12,35} = 0,951V$$

Kurzgeschlossen U_{VCC}

$$U_{p2} = U_{VCC} * \frac{R_{13}}{R_{13}+R_2} = 4,39V * \frac{3,19}{7,90} = 1,777VV$$

$$\Rightarrow U_p = U_{p1} + U_{p2} = 2,728V$$

- **2. Fall:** U_{low}

Kurzgeschlossen: U_a

$$U_{p1} = U_{VCC} * \frac{R_{12}}{R_{12}+R_3} = 5V * \frac{2,35}{12,35} = 0,951V$$

Kurzgeschlossen U_{VCC}

$$U_{p2} = U_{VCC} * \frac{R_{13}}{R_{13}+R_2} = 0,029V * \frac{3,19}{7,90} = 0,0117V$$

$$\Rightarrow U_p = U_{p1} + U_{p2} = 0,963V$$

4.3 Simulationen

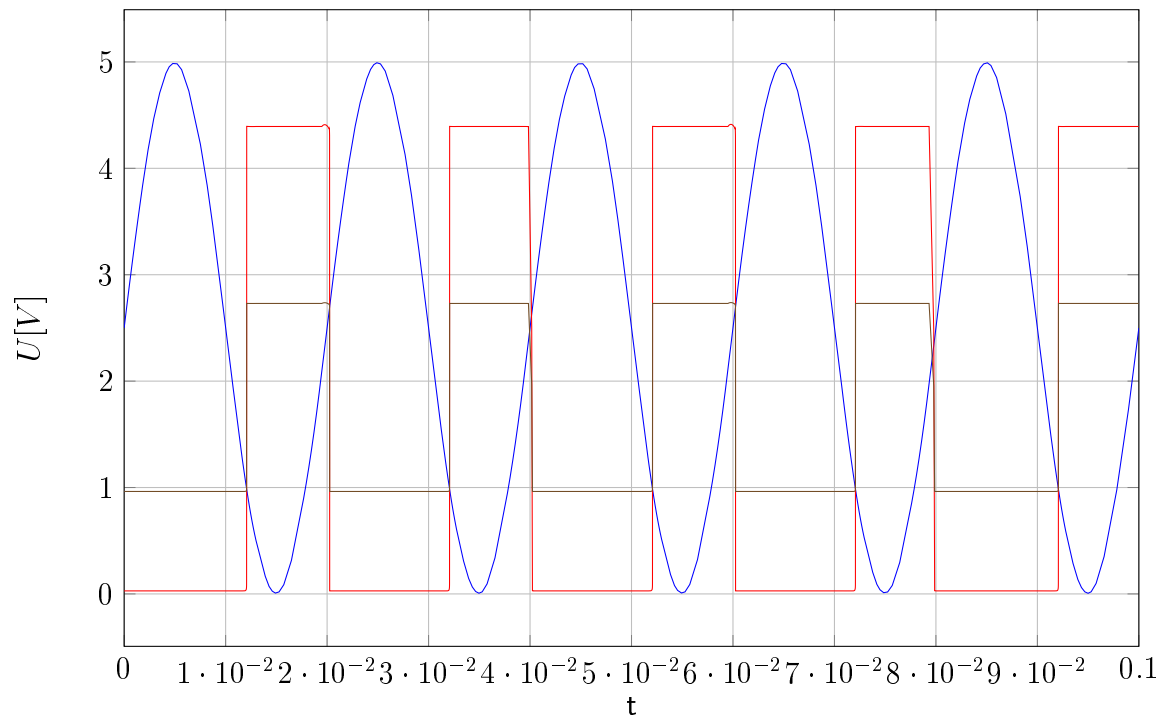


Abbildung 18: Sinus, $V_{PP} = 5V$, $f = 50Hz$,

In dieser Abbildung ist die Eingangsspannung(blau), die Ausgangsspannung(rot) und die Spannung am nicht-invertierenden Eingang(braun) des OPVs zu sehen. Mit den drei Widerständen und der Referenzspannung von $5V$ werden die Schaltschwellen eingestellt. Die obigen Berechnungen werden in diesem Diagramm bestätigt da man die Schaltschwellen von $0,963V$ bzw. $2,729V$ sehr gut erkennen kann.

Erreicht der Sinus $2,729V$ auf der steigenden Flanke springt der Ausgang auf $-U_v$ in diesem Fall Masse, und werden $0,963V$ auf der fallenden Flanke erreicht springt der Ausgang auf $+U_v$ in diesem Fall $5V$. Der Wert der positiven Versorgungsspannung wird nicht genau erreicht da es sich nicht um einen 'Rail-to-Rail' OPV handelt.

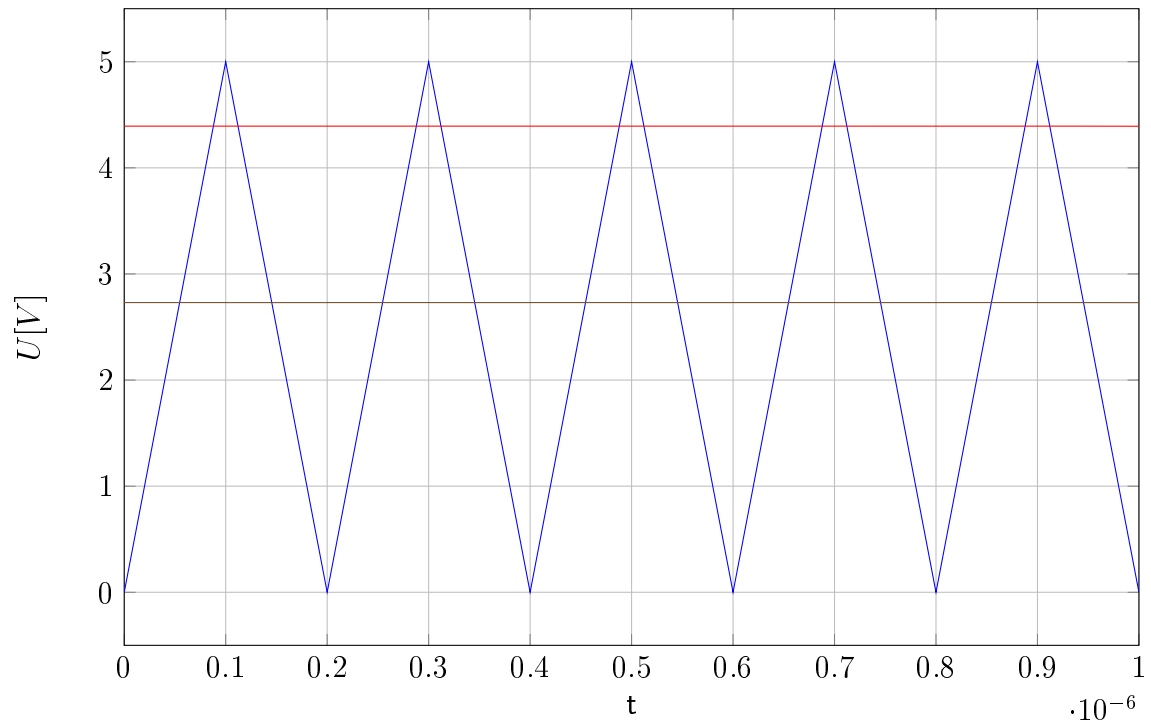


Abbildung 19: Dreieck, $V_{PP} = 5V$, $f = 5MHz$

Wie in der Abbildung zu erkennen ist, ist die Spannung am Ausgang bzw. am nicht-invertierenden Eingang des OPVs konstant. Dies liegt daran, dass ein realer OPV nicht unendlich schnell schalten kann. Eine Frequenz von $5MHz$ ist für diesen OPV definitiv zu schnell und am Ausgang wird nun etwas völlig anderes Ausgegeben als man es sich von einem Schmitt-Trigger erwarten würde.

