

Versuchsauswertung: Operationsverstärker

(P2-59,60,61)

Christian Buntin, Jingfan Ye

Gruppe Mo-11

Karlsruhe, 17. Mai 2010

Inhaltsverzeichnis

1	Emitterschaltung eines Transistors	2
1.1	Einstufiger Transistorverstärker	2
1.2	Verstärkung einer Dreiecksfrequenz	2
1.3	Verstärkung ohne Emitterkondensator	2
1.4	Frequenzabhängigkeit der Verstärkung	4
2	Grundschtaltung eines Operationsverstärkers	4
2.1	Nichtinvertierender Verstärker	4
2.2	Eingangs- und Ausgangswiderstand	5
2.3	Frequenzabhängigkeit der Verstärkung	6
3	Die invertierende Grundschtaltung	6
3.1	Invertierender Verstärker mit zehnfacher Verstärkung	6
3.2	„Addierer“	8
3.3	Integrierer	8
3.4	Differenzierer	9
4	Komplexere Schaltungen mit Operationsverstärkern	9
4.1	Idealer Einweggleichrichter	9
4.2	Generator für Dreieck- und Rechtecksignale	11
4.3	Programmierte Differentialgleichung 2. Ordnung	12

Vorbemerkung

Wenn nicht anders angegeben, so beziehen sich die Spannungswerte immer auf den Spitze-Spitze-Wert.

1 Emitterschaltung eines Transistors

1.1 Einstufiger Transistorverstärker

Wir haben den einstufigen gleichstromgegekoppelten Transistorverstärker nach der Vorbereitungshilfe aufgebaut. Den Arbeitspunkt haben wir zu 7,89 V (Gleichspannung) gemessen. Dies ist hier ein sehr guter Wert, da dieser in der Mitte zwischen 0 V und der Maximalspannung 15 V liegt.

1.2 Verstärkung einer Dreiecksfrequenz

Wir haben bei zwei verschiedenen Ausgangsamplituden (Abbildungen 1 und 2) die Verstärkung bestimmt:

Eingangsspannung U_E [V]:	26 mV	74 mV
Ausgangsspannung U_A [V]:	3,20 V	10,4 V
Verstärkung $v_U = \frac{U_A}{U_E}$:	123	141

Die mittlere Verstärkung dieses Transistorverstärkers beträgt somit $v_U = 132$. Bei höherer Amplitude zeigte sich, dass der obere Teil der Ausgangsamplitude niedriger ausfällt als der Untere. Die Schaltung verstärkt hier also nicht mehr beide Halbwellen gleichermaßen.

1.3 Verstärkung ohne Emitterkondensator

Im Gegensatz zur letzten Aufgabe wurde das Eingangssignal hier ohne Verzerrungen verstärkt. Allerdings fiel die Verstärkung deutlich geringer aus:

Eingangsspannung U_E [V]:	432 mV	688 mV	1,40 V	2,16 V
Ausgangsspannung U_A [V]:	1,88 V	3,04 V	6,00 V	9,40 V
Verstärkung $v_U = \frac{U_A}{U_E}$:	4,35	4,42	4,29	4,35

Somit erhalten wir eine mittlere Verstärkung von $v_U = 4,35$. Dies liegt etwas unterhalb des erwarteten Wertes von $v_U = \frac{R_C}{R_E} = 4,7$, allerdings hatten die Widerstände alle Toleranzen von bis zu 5%. Daher ist unser Messergebnis ein akzeptabler Wert für die Verstärkung.

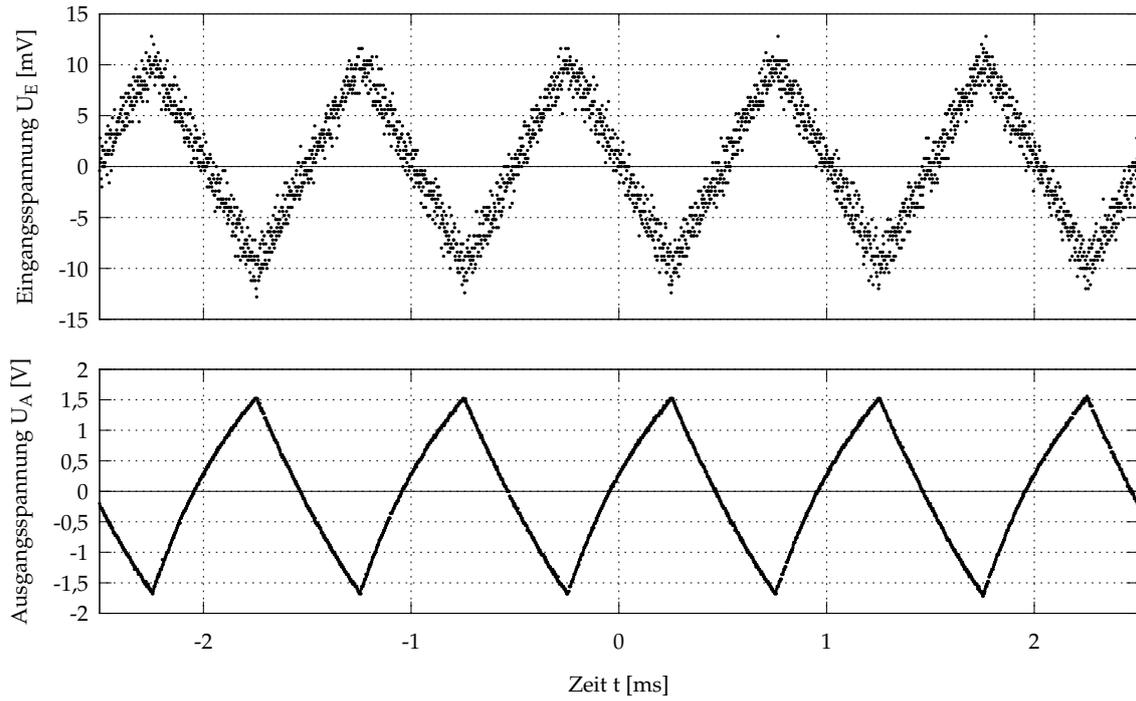


Abbildung 1: Transistorverstärker bei niedriger Ausgangsamplitude

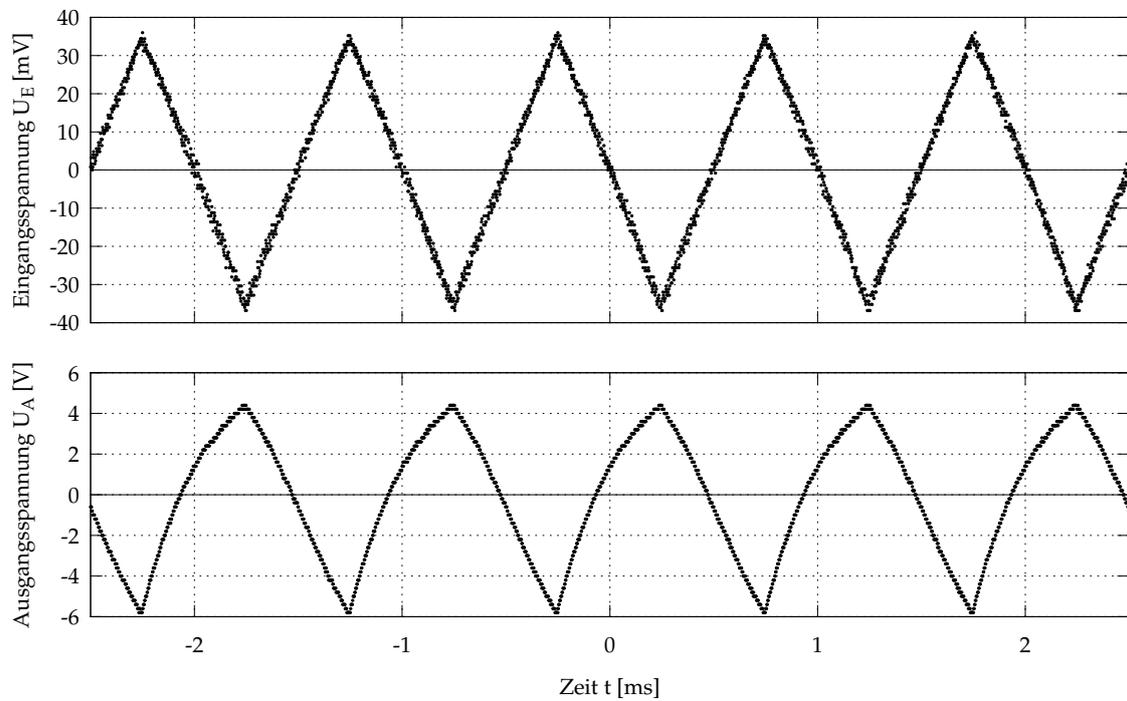


Abbildung 2: Transistorverstärker bei hoher Ausgangsamplitude

1.4 Frequenzabhängigkeit der Verstärkung

Wir haben die frequenzabhängige Verstärkung des gleichstromgegekoppelten und des stromgegekoppelten Transistorverstärkers bestimmt:

Frequenz [Hz]	Stromgegekoppelt			Gleichstromgegekoppelt		
	U_E [V]	U_A [V]	v_U	U_E [V]	U_A [V]	v_U
10	1,64	2,56	1,6	0,170	1,72	10,1
25	2,12	4,32	2,0	0,220	4,08	18,5
50	2,16	6,80	3,1	0,224	6,48	28,9
100	2,16	8,60	4,0	0,220	9,80	44,5
500	2,16	9,40	4,4	0,184	13,0	70,7
1 k	2,16	9,40	4,4	0,180	13,0	72,2
5 k	2,28	9,80	4,3	0,184	13,8	75,0
10 k	2,28	9,80	4,3	0,184	13,8	75,0
50 k	2,28	9,80	4,3	0,184	13,8	75,0
100 k	2,28	9,80	4,3	0,184	13,8	75,0

Beim gleichstromgegekoppeltem Transistorverstärker sieht man in Abbildung 3 auf der nächsten Seite eine starke Frequenzabhängigkeit der Verstärkung, die nur durch die maximale Ausgangsspannung der Schaltung von 15 V begrenzt ist. Der von uns maximal gemessene Wert von 13,8 V liegt an Spannungsabfällen an Widerständen und zudem vermutlich an der ungenauen Spannungsangabe der Quelle. Die Verstärkung der stromgegekoppelten Schaltung dagegen pendelt sich recht schnell bei der oben gemessenen Verstärkung von 4,35 ein.

Bei geringen Frequenzen ist beidesmal die Verstärkung gering, da die Koppelkondensatoren am Ein- und Ausgang nur hohe Frequenzen gut durchlassen. Bei der gleichstromgegekoppelten Schaltung allerdings wird durch den Emitterkondensator die Rückkopplung für hohe Frequenzen aufgehoben, wodurch die Verstärkung, anders als bei Stromgegekoppelung, weiter steigt.

2 Grundschtaltung eines Operationsverstärkers

2.1 Nichtinvertierender Verstärker

Wir haben mit einem Operationsverstärker einen nichtinvertierenden Verstärker aufgebaut. Nach der Vorbereitung berechnet sich dessen Verstärkung v_U zu

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

Mit unserer Messung erhalten wir eine tatsächliche Verstärkung von

$$v_U = \frac{U_A}{U_E} = \frac{3,56 \text{ V}}{0,320 \text{ V}} = 11,13.$$

Somit lässt sich also mit den goldenen Regeln die Verstärkung der Schaltung sehr gut bestimmen.

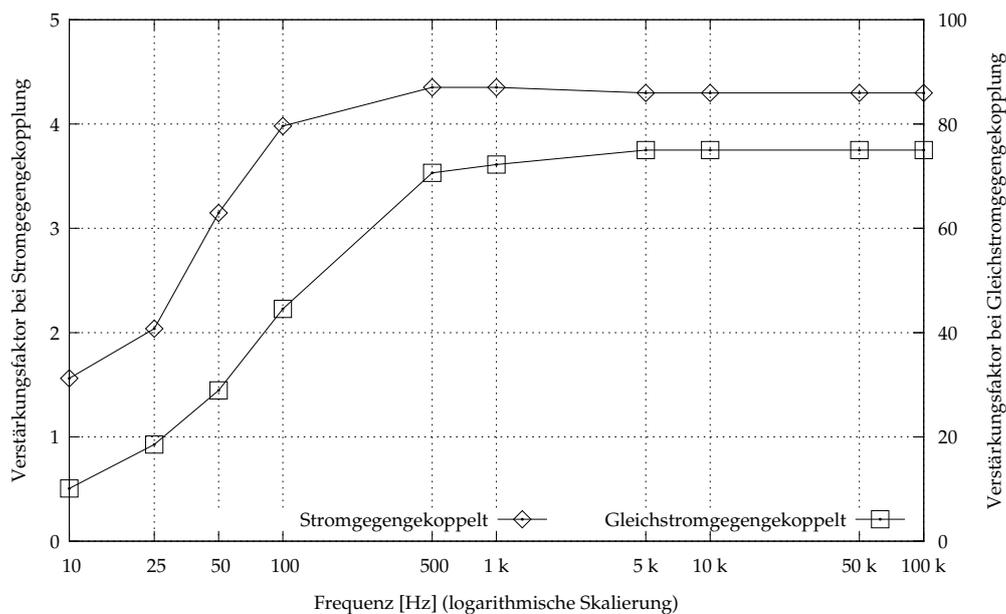


Abbildung 3: Frequenzabhängige Verstärkung der Transistorverstärker

2.2 Eingangs- und Ausgangswiderstand

Eingangswiderstand

Wir haben den Eingangswiderstand der Schaltung bestimmt, indem wir zwischen dem Eingang und dem Verstärker einen Messwiderstand $R_M = 1 \text{ M}\Omega$ geschaltet und den effektiven Spannungsabfall $U_{R_M}^{\text{eff}}$ an ihm gemessen haben. Mit den Messwerten $U_{R_M}^{\text{eff}} = 91,5 \text{ mV}$ und $U_E^{\text{eff}} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \cdot 324 \text{ mV}$ erhalten wir nach der Vorbereitung für den Ausgangswiderstand X :

$$X = R_M \cdot \left(\frac{U_E^{\text{eff}}}{U_{R_M}^{\text{eff}}} - 1 \right) = 252 \text{ k}\Omega$$

Dies ist im Vergleich zu den anderen Widerständen immer noch wesentlich größer.

Ausgangswiderstand

Um den Ausgangswiderstand der Schaltung zu bestimmen, haben wir einen verstellbaren Widerstand in den Ausgang geschaltet und diesen so eingestellt, dass die Ausgangsspannung auf die Hälfte ihres ursprünglichen Wertes abfällt.

Nach dem Ohmschen Gesetz gilt nun, dass Ausgangswiderstand und der verstellbare Widerstand gleich groß sind. Somit erhalten wir nach Messung des verstellbaren Widerstandes für den Ausgangswiderstand einen Wert von $39,0 \text{ }\Omega$.

Dies ist ein sehr geringer Widerstand und entspricht auch unseren Erwartungen.

2.3 Frequenzabhängigkeit der Verstärkung

Wir haben die frequenzabhängige Verstärkung des nichtinvertierenden Verstärkers bestimmt:

Frequenz [Hz]	U_E [V]	U_A [V]	v_U
10	0,504	5,68	11,3
100	0,504	5,52	11,0
1 k	0,504	5,52	11,0
10 k	0,504	5,52	11,0
25 k	0,504	5,12	10,2
50 k	0,504	4,08	8,1
75 k	0,504	2,96	5,9
100 k	0,504	2,24	4,4

Im Abbildung 4 zeigt sich, dass die Verstärkung bei Frequenzerhöhung lange Zeit konstant ist. Erst für sehr hohe Frequenzen fällt diese rapide ab. Doch sogar dort blieb das Signal immer noch recht gut verzerrungsfrei (Abbildung 5 auf der nächsten Seite).

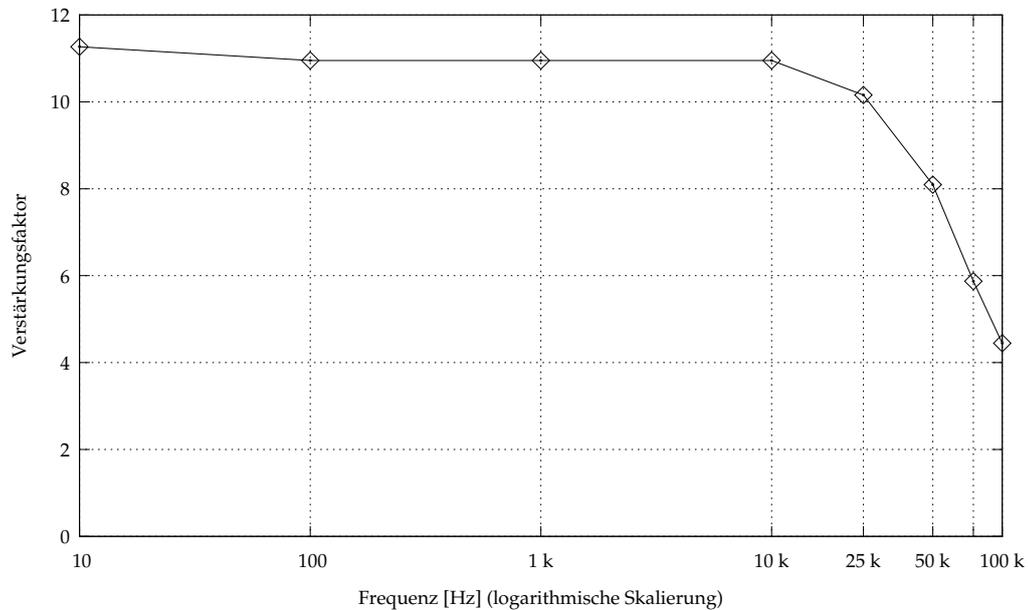


Abbildung 4: Frequenzabhängige Verstärkung des nichtinvertierenden Verstärkers

3 Die invertierende Grundsaltung

3.1 Invertierender Verstärker mit zehnfacher Verstärkung

Wir haben einen zehnfachen Verstärker nach der Vorbereitungshilfe aufgebaut. Anhand der Signale auf Abbildung 6 auf der nächsten Seite sieht man deutlich, dass der Verstärker invertiert und die Verstärkung ziemlich gut dem Faktor 10 entspricht. Mit unseren Messwerten

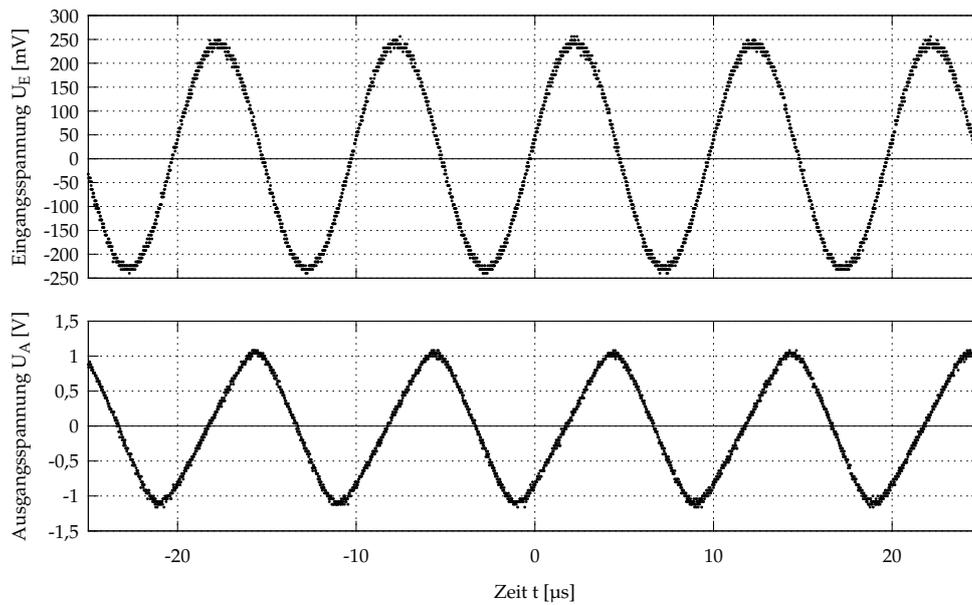
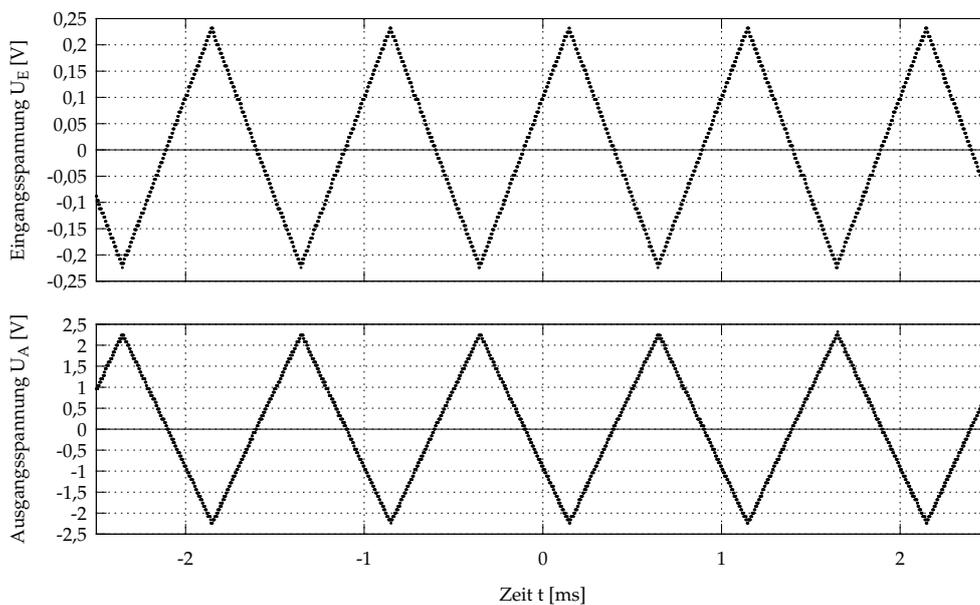


Abbildung 5: Signale am nichtinvertierenden Verstärker bei 100 kHz

erhalten wir für die Verstärkung u_V :

$$u_V = \frac{U_A}{U_E} = \frac{4,56 \text{ V}}{0,456 \text{ V}} = \frac{6,64 \text{ V}}{664 \text{ V}} = 10$$

Dies entspricht genau dem in der Vorbereitung berechneten Wert von $v_U = \frac{R_2}{R_1} = 10$.



17. Mai 2010 **Abbildung 6:** Signale am invertierenden 10-fach-Verstärker bei 1 kHz

3.2 „Addierer“

Wir haben einen Addierer aufgebaut und mit diesem auf eine Dreiecksspannung eine Gleichspannung addiert. Mit Hilfe des Mittelwertes am Oszilloskop konnten wir beobachten, wie sich die Ausgangskurve je nach addierter Gleichspannung nach oben und unten verschoben hat. Da allerdings nur eine Gleichspannung addiert wurde, blieben die Spitzenspannungswerte unverändert.

Bei einer Addition einer Gleichspannung $U_{E2} = 2,00 \text{ V}$ auf die Dreiecksspannung mit dem Mittelwert $\bar{U}_{E1} = 0,0158 \text{ V}$ erhielten wir eine Ausgangs-Dreiecksspannung mit einem Mittelwert von $\bar{U}_A = -1,93 \text{ V}$. Dies entspricht im Rahmen der Genauigkeit der Gleichspannungsmessung in etwa dem erwarteten Ergebnis, da die Summe invertiert ausgegeben wird.

3.3 Integrierer

Wir haben einen Integrierer aufgebaut und eine Dreiecksspannung und eine Rechteckspannung integrieren lassen.

Bei der Integration der Dreiecksspannung (Abbildung 7) zeigte sich ein parabelartiger Kurvenverlauf. An den Nullstellen der Dreiecksspannung liegen wie erwartet die Minima und Maxima der Parabelkurven und an deren Extrema die Wendepunkte.

Die Integration der Rechteckspannung (Abbildung 8 auf der nächsten Seite) ergab wie erwartet eine Dreiecksspannung. Bei ansteigendem Verlauf dieser hat die Rechteckspannung eine negative Amplitude (und umgekehrt). Daran sieht man deutlich, dass der Integrierer ebenso wie der Addierer das Ergebnis invertiert.

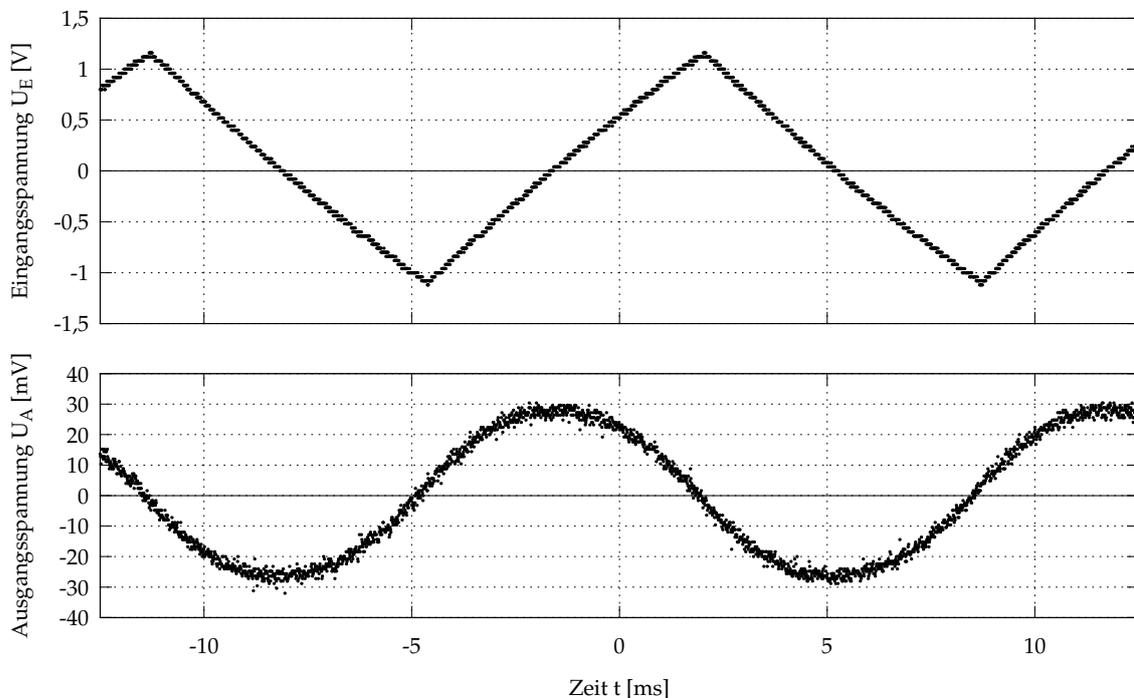


Abbildung 7: Integration einer Dreiecksspannung

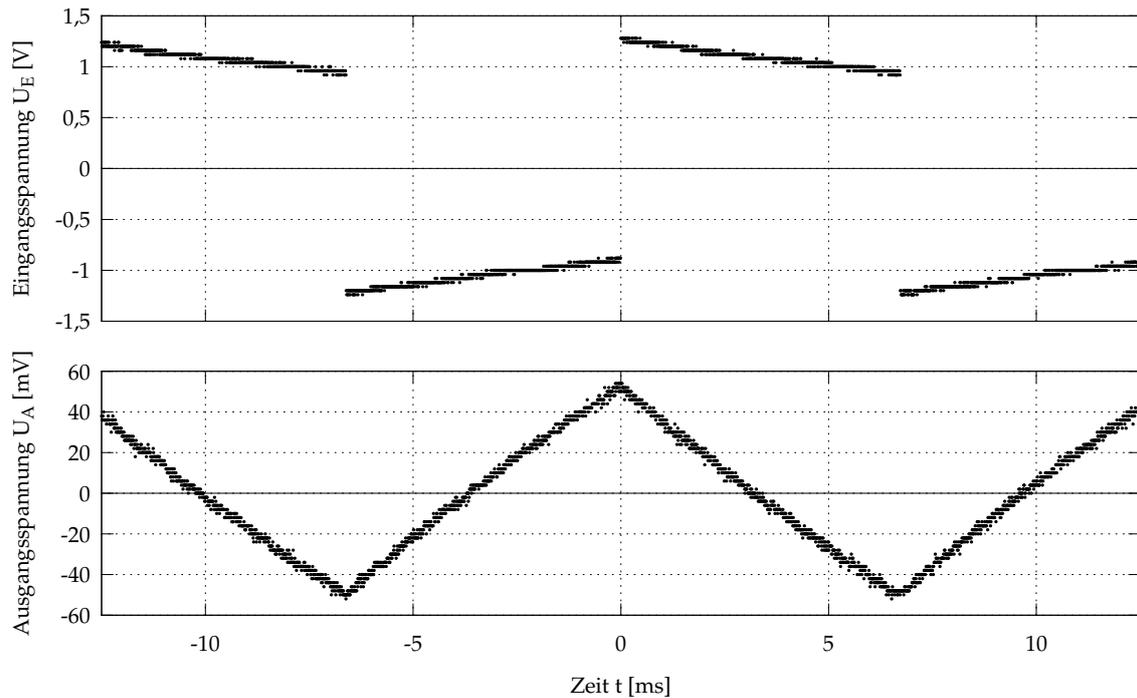


Abbildung 8: Integration einer Rechteckspannung

3.4 Differenzierer

Wir haben einen Differenzierer aufgebaut und eine Dreiecksspannung und eine Rechteckspannung ableiten lassen.

Die Differentiation der Dreiecksspannung (Abbildung 9 auf der nächsten Seite) ergab wie erwartet eine Rechteckspannung, die allerdings invertiert ausgegeben wurde. An den nicht differenzierbaren Extrema sind deutlich Singularitäten in der Rechteckspannung zu erkennen.

Bei der Differentiation des Rechtecksignals (Abbildung 10 auf der nächsten Seite) wurde erwartungsgemäß ein Signal mit 0 V ausgegeben. Allerdings traten an den nicht differenzierbaren Stellen der Rechteckspannung starke Spannungsspitzen auf, welche nur durch die Maximalspannung des Operationsverstärkers von ± 15 V begrenzt wurden.

4 Komplexere Schaltungen mit Operationsverstärkern

4.1 Idealer Einweggleichrichter

Wir haben einen idealen Gleichrichter aufgebaut und konnten dann an den beiden Ausgängen die beiden erwarteten Halbwellen abgreifen (Abbildung 11 auf Seite 11). Dieser Gleichrichter gibt die volle Halbwellenspannung aus, ohne sie um die Diodenknickspannung zu verringern.

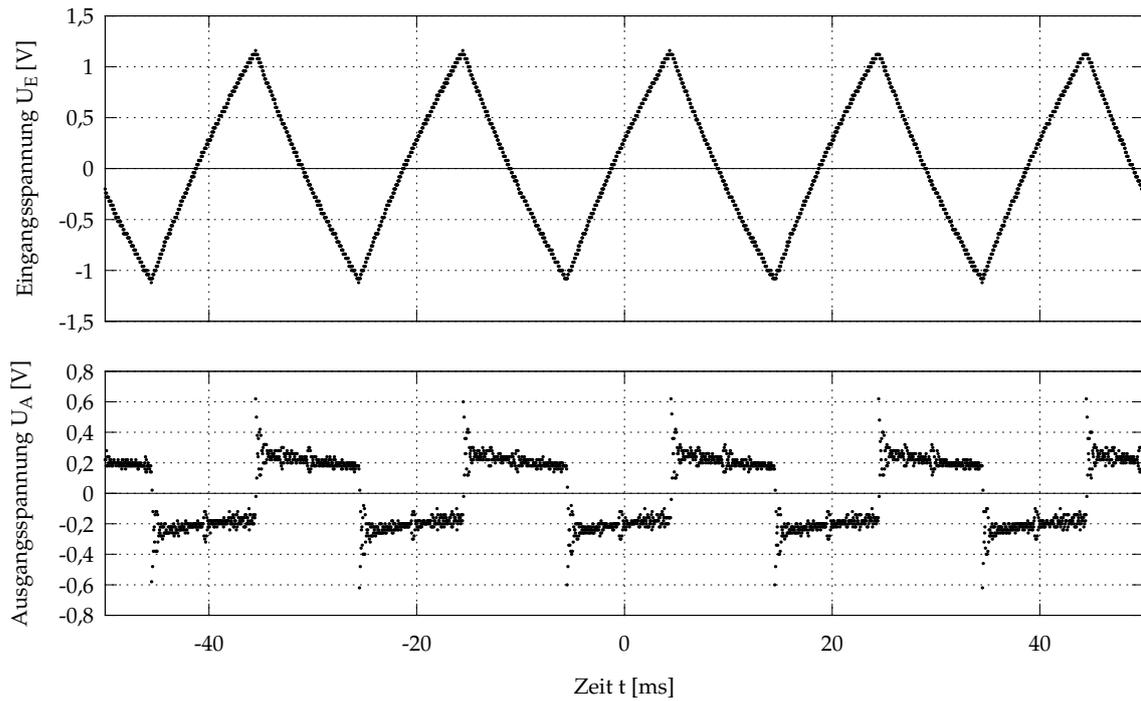


Abbildung 9: Differentiation einer Dreiecksspannung

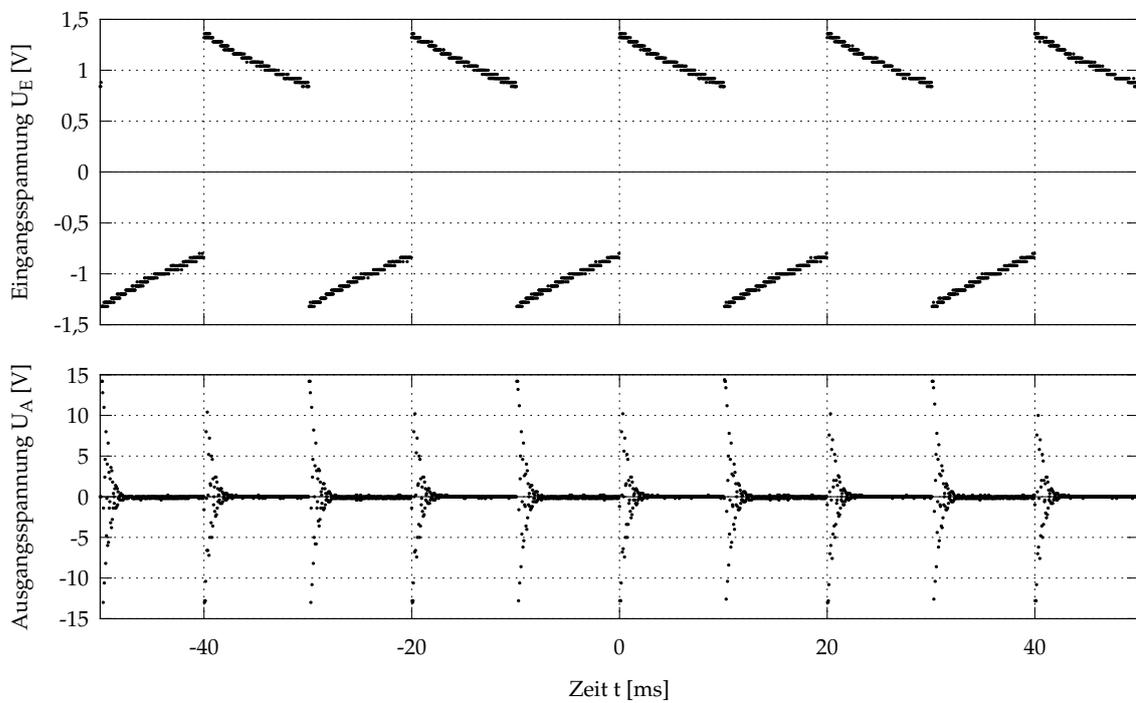


Abbildung 10: Differentiation einer Rechtecksspannung

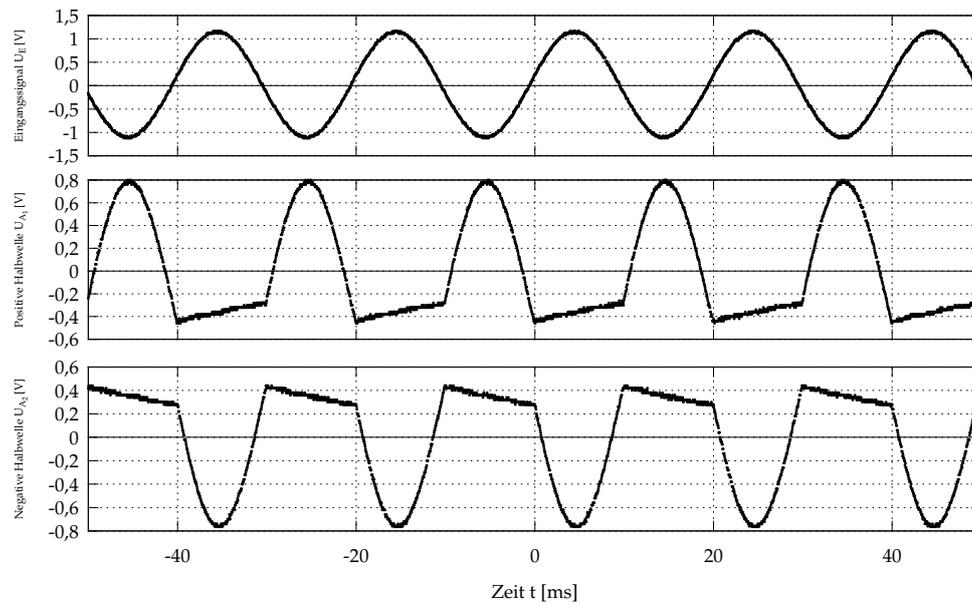


Abbildung 11: Halbwellenspannungen am idealen Gleichrichter

4.2 Generator für Dreieck- und Rechtecksignale

Wir haben den Signalgenerator aufgebaut und konnten die dadurch erzeugten Rechteck- und Dreiecksspannungen abgreifen (Abbildung 12).

Dabei erhielten wir beidesmal ein Signal der Frequenz 460 Hz. Die Rechteckspannung liegt mit 28,0 V am Maximum des Operationsverstärkers, da dieser hier als Schmitt-Trigger mit quasi unendlicher Verstärkung arbeitet. Für die Amplitude des Dreieckssignals erhalten wir einen Wert von 15,6 V.

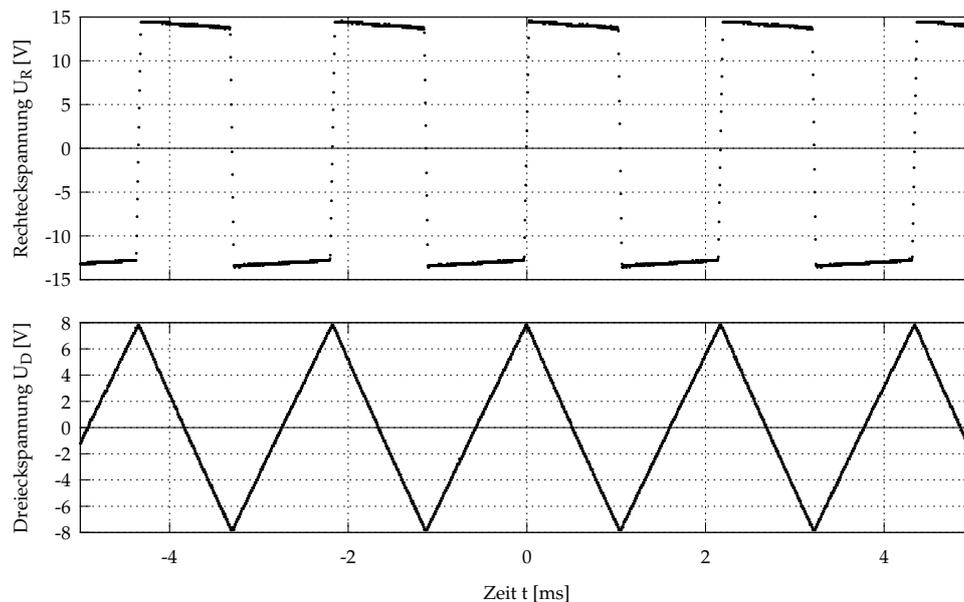


Abbildung 12: Ausgangssignale des Signalgenerators

4.3 Programmierte Differentialgleichung 2. Ordnung

Wir haben eine programmierte Differentialgleichung zweiter Ordnung aufgebaut und damit versucht, eine Integralgleichung 2. Ordnung zu simulieren.

Mit geringer Dämpfung bekamen wir eine sinusartige Kurve als Schwingfall zu sehen (Abbildung 13). Diese schwang mit einer Amplitude von 26,8 V bei einer Frequenz von 33,33 Hz.

Wenn wir den Widerstand und somit auch die Dämpfung erhöhten, reagierte die Schwingung sehr stark verzögert. Daher fiel die Schwingung in einem bestimmten Widerstandsbe-
reich sehr schnell auf 0 ab. Den Kriechfall oder gar den aperiodischen Grenzfall konnten wir aus diesem Grund leider nicht simulieren.

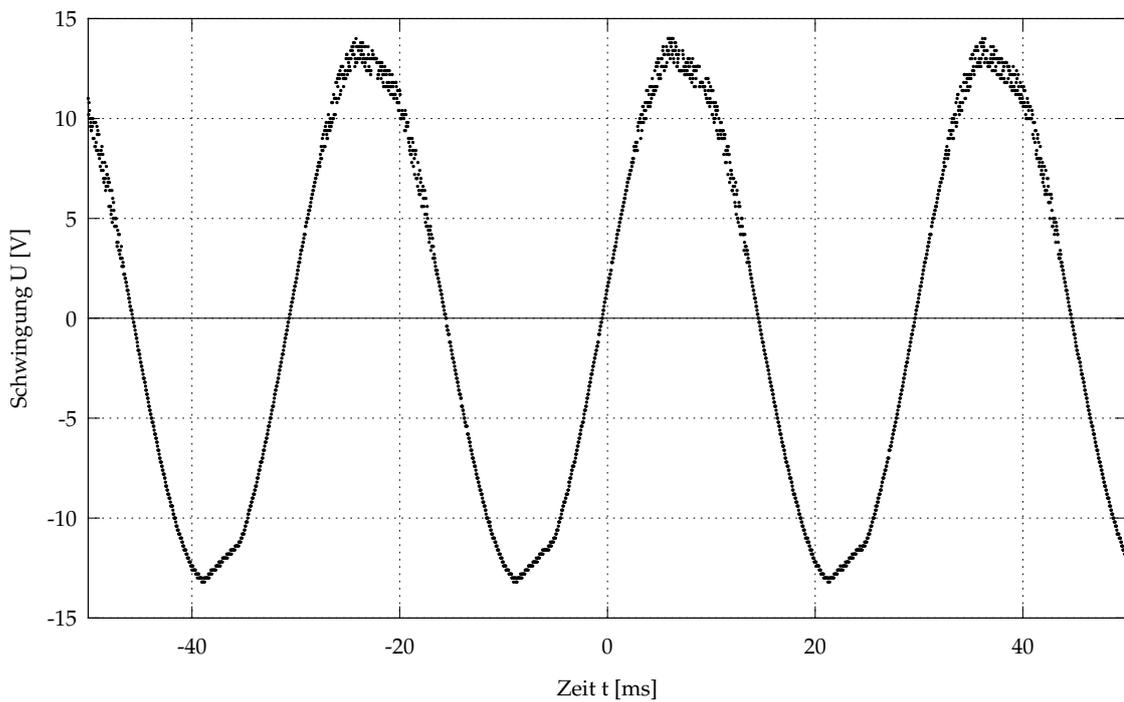


Abbildung 13: Schwingfall als Lösung der Differentialgleichung