

Dokumentation

zum Projekt

PWM-Verstärker

HTL
St. Pölten

EL

Klasse 3BHEL	Mitarbeiter HIRSCH L.	Unterschrift
Übungs- / Abgabedatum 12. März. 2014 23. April 2014	Mitarbeiter HOFSTÄTTER A.	Unterschrift
Lehrer Tillich	Mitarbeiter	Unterschrift
Note	Mitarbeiter	Unterschrift

Projekt

PWM-Verstärker

Verwendete Geräte

Nr.	Gerät	Hersteller	Typ
1.	Netzgerät	EMG	18135
2.	Digital Multimeter	TE.Electronic	VA18B
3.	Oszilloskope	Tektronix	TDS 1001B
4.	Funktionsgenerator	HAMEG	HM8030-6

1 Inhaltsverzeichnis

1	INHALTSVERZEICHNIS	2
2	AUFGABENSTELLUNG	4
3	GRUNDPRINZIP DES PWM-VERSTÄRKERS	4
3.1	DREIECKSGENERATOR	5
3.1.1	REALISIERUNG DES DREIECKSGENERATORS	5
3.2	PWM-STUFE	5
3.2.1	REALISIERUNG DER PWM-STUFE	6
3.3	ENDSTUFE	6
3.3.1	REALISIERUNG DER ENDSTUFE	6
3.4	LC-TIEFPASS (2. ORDNUNG)	7
4	BERECHNUNG UND DIMENSIONIERUNG	8
4.1	VORGABEWERTE	8
4.2	DREIECKSGENERATOR	8
4.3	LC - FILTER	8
5	DREIECKSGENERATOR IM LEERLAUF	9
5.1	MESSAUFBAU	9
5.2	MESSERGEBNISSE	10
5.2.1	PIN 3 (NE555) - $U_3(t)$	10
5.2.2	KONDENSATOR - $U_\Delta(t)$	11
5.2.3	ANDERE MESSUNGEN	11
6	PWM-VERSTÄRKER IM LEERLAUF	12
6.1	MESSAUFBAU	12
6.2	MESSERGEBNISSE	12
6.2.1	KOMPARATOR	12
6.2.2	PWM-STUFE	13
7	PWM-VERSTÄRKER MIT (ERSATZ)LAST	14
7.1	ALLGEMEINE INFORMATIONEN	14
7.2	AUSSTEUERBARKEIT	14
7.2.1	MESSAUFBAU	14
7.2.2	MESSERGEBNISSE	15
7.3	LINEARITÄT	16
7.3.1	MESSAUFBAU	16
7.3.2	MESSERGEBNISSE (100 Hz)	16
7.3.3	MESSERGEBNISSE (1 kHz)	17
7.3.4	MESSERGEBNISSE (10 kHz)	17
7.4	IMPULSVERHALTEN	18
7.4.1	MESSAUFBAU	18
7.4.2	MESSERGEBNISSE (100 Hz)	18
7.4.3	MESSERGEBNISSE (1 kHz)	19
7.4.4	MESSERGEBNISSE (10 kHz)	19

7.5	DYNAMISCHE MESSUNGEN	20
7.5.1	MESSAUFBAU	20
7.5.2	MESSERGEBNISSE	20
7.5.2.1	Messwerttabelle	20
7.5.2.2	Bodediagramm	21
8	<u>PWM-VERSTÄRKER MIT BOOTSTRAPPING</u>	<u>22</u>
8.1.1	MESSAUFBAU	22
8.1.2	MESSERGEBNISSE (LEERLAUF)	23
8.1.2.1	PWM-Stufe	23
8.1.2.2	Gegentaktstufe	23
8.1.2.3	Spule	24
8.1.2.4	Kondensator	24
9	<u>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</u>	<u>25</u>

2 Aufgabenstellung

Ziel des Projekts war es einen PWM-Verstärker (**P**uls**w**eiten**m**odulations-Verstärker) zu bauen. In finaler Ausführung sollte der aufgebaute Verstärker mit einer einzelnen Versorgung von 15 V auskommen und diverse Inputsignale (z.B. Audiosignale), aber auch einfache Signale eines Funktionsgenerators verstärken.

Diverse Frequenzen und Widerstandswerte waren frei zu wählen. Alle daraus resultierenden Werte waren zu ermitteln und anschließend zu berechnen.

Nach dem ersten Setup sowie den dazu gehörigen Dimensionierungen und Berechnungen wurde der PWM Verstärker und alle weiteren Umbauten am Steckbrett realisiert und aufgebaut.

3 Grundprinzip des PWM-Verstärkers

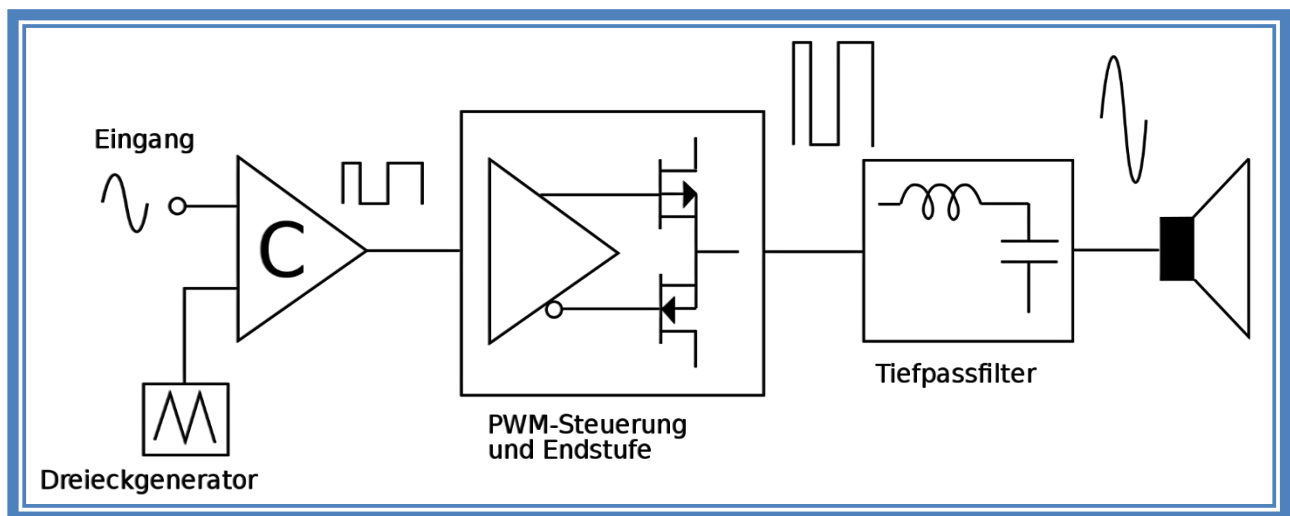


Abbildung 1. – Schema eines PWM-Verstärkers

Ablauf:

- 1.) Codierung des Eingangssignal in digitale PWM Signale
- 2.) Verstärkung durch Endstufe
- 3.) Demodulation des PWM-Signals durch Tiefpass

Zuerst wird das Eingangssignal (z.B. Audiosignal einer MP3 Datei) durch eine sogenannte PWM-Stufe in digitale Signale konvertiert. Dabei werden die Nutzdaten eines analogen Signals in das Puls-Pausen-Verhältnis (engl. Duty-Cycle) eines Rechtecksignals eingearbeitet.

Alle Informationen des analogen Signales befinden sich nun in einem digitalen Rechtecksignal mit verschiedenen Tastverhältnissen.

Um aus einem codiertem PWM Signal wieder ein analoges Nutzsignal zu erzeugen benötigt man eine gewisse Art an Rekonstruktion. Durch einen so genannten Rekonstruktionsfilter (hier RC-Tiefpass), welcher hinter die Leistungsstufe geschaltet wird und so ein dem Eingangssignal entsprechender kontinuierlicher Spannungsverlauf erzeugt.

Die Nutzdaten des Originalsignals sind nun wiederhergestellt und können z.B. an einen Lautsprecher wiedergegeben werden.

3.1 Dreiecksgenerator

Um ein einwandfreies Dreieckssignal zu erzeugen wurde ein Schmitttrigger eingesetzt. Dieser schaltet kontinuierlich die Ströme zweier Stromquellen durch an einen Kondensator durch.

Dadurch, dass Spannungen am Kondensator nie springen dürfen, Ströme hingegen doch, entsteht durch die Rechteckspannung am Kondensator C1 eine kontinuierliche Dreiecksspannung.

Zur Erzeugung des Rechtecksignals für den Schalter $S(t)$, welcher mit 4 Dioden realisiert wurde, kam der Timerbaustein NE555 zum Einsatz.

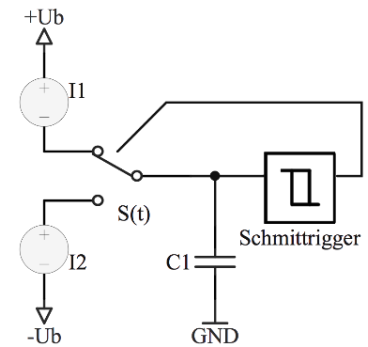


Abbildung 2. – Schema eines Dreiecksgenerators

3.1.1 Realisierung des Dreiecksgenerators

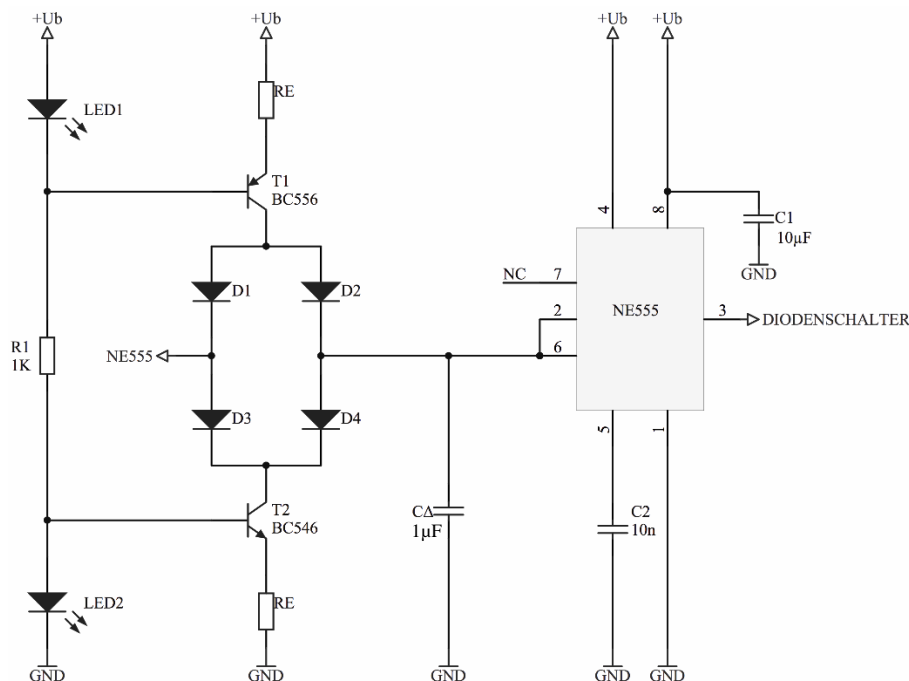


Abbildung 3. – Praktische Realisierung des Dreiecksgenerators

3.2 PWM-Stufe

Eine Klasse-D PWM-Stufe besteht aus einem analogen Komparator an welchem zwei Signale verarbeitet bzw. verglichen werden. Mithilfe dieses Komparators ist es nun möglich die analogen Signale in digitale PWM-Signale umzuwandeln.

- 1.) Analoges Nutzsignal - $U_s(t)$
- 2.) Trägersignal als Referenz (Dreieck) - $U_\Delta(t)$

Als physikalisches Bauteil wurde ein LM393 gewählt, dieser wurde durch die asymmetrische Versorgung von +15V und GND gespeist.

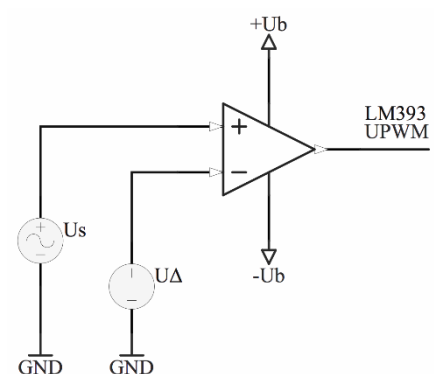


Abbildung 4. – Schema einer PWM-Stufe

Der Ausgang dieses Komparators liefert nun das fertige PWM Signal welche alle Informationen enthält. Sprich die analogen Signalinformationen wurden in das digitale PWM Signal *eingearbeitet*.

3.2.1 Realisierung der PWM-Stufe

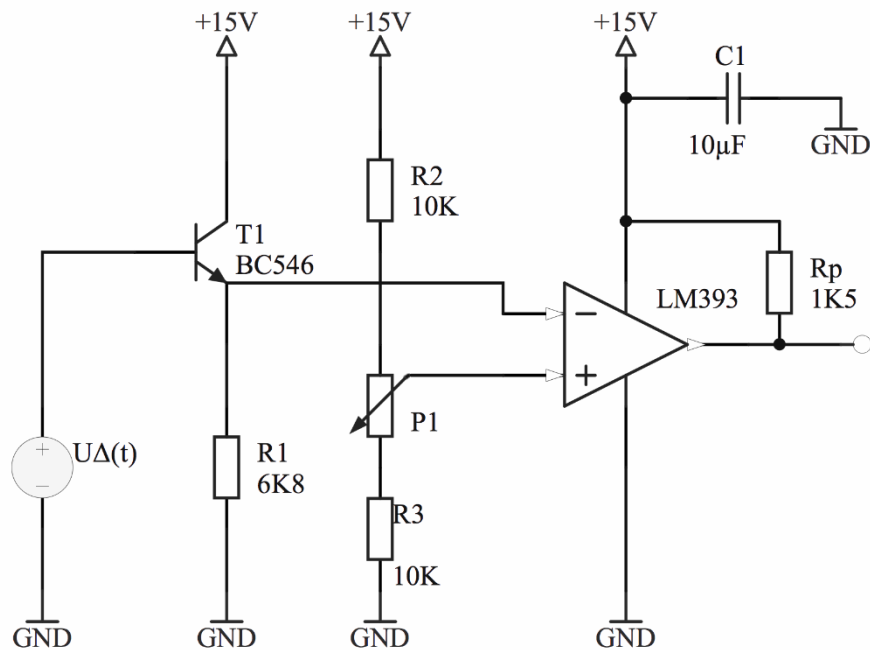


Abbildung 5. – Praktische Realisierung einer PWM-Stufe

3.3 Endstufe

Die Endstufe ist das letzte Element bzw. die letzte Verstärkerstufe eines Leistungsverstärkers.

Dadurch dass die Endstufe mit einem PWM Signal angesteuert wird, können die Hauptbestandteile dieser, die Transistoren im Schaltbetrieb gefahren werden, wodurch die Schaltelemente entweder maximal leitend oder maximal isolierend sind (also nur zwei Zustände kennen).

So bleibt der undefinierte mittlere Zustand weg, an welchen Transistoren die meisten Leistung verbrauchen.

3.3.1 Realisierung der Endstufe

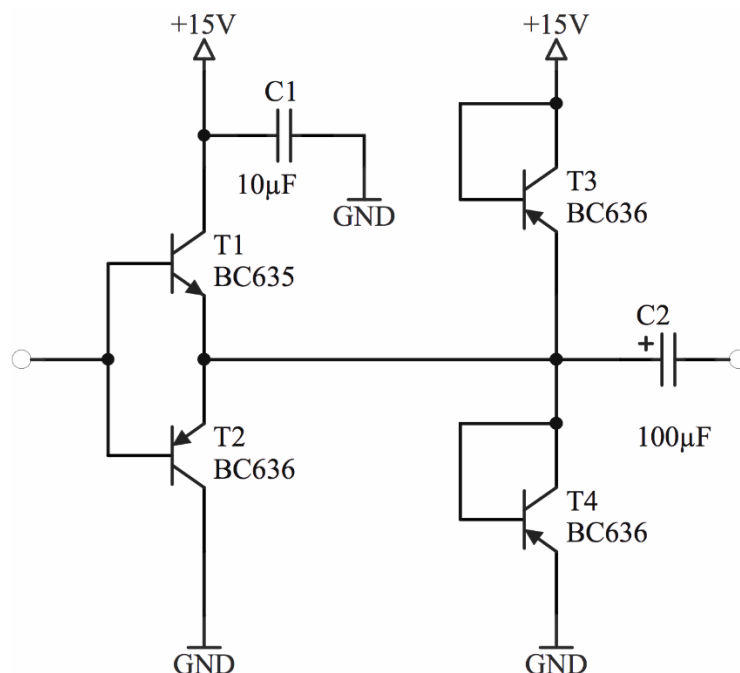


Abbildung 6. – Praktische Realisierung einer PWM-Stufe

3.4 LC-Tiefpass (2. Ordnung)

Um alle Signalinformationen aus dem digital vorliegenden PWM Signal wieder zu extrahieren, wurde ein Tiefpass gewählt. Da ein RC-Tiefpass (1.Ordnung) fehlende Genauigkeit und Rauschunterdrückung aufwies wurde ein LC-Tiefpass (2.Ordnung) bevorzugt.

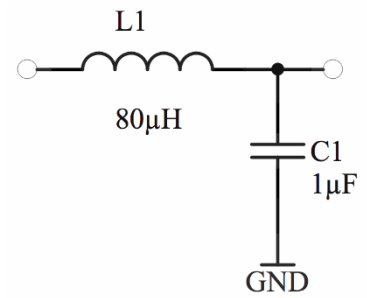


Abbildung 7. – RC-Tiefpass 2. Ordnung

4 Berechnung und Dimensionierung

4.1 Vorgabewerte

Die folgenden Werte waren Teil der Aufgabenstellung.

$$U_E = 15 \text{ V}$$

Der durchfließende Strom konnte frei gewählt werden, musste aber im Bereich von $100\mu\text{A} - 10\text{mA}$ liegen.

4.2 Dreiecksgenerator

Aus dem zuvor gewählten Strom konnte die Frequenz des Dreiecksgenerators berechnet werden.

$$T * \Delta U = C * \Delta U$$

$$I * \frac{T}{2} = C * 5V$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{I}{2 * C * \Delta U} = \frac{1 \text{ mA}}{2 * 1 \text{ nF} * 5V} \rightarrow f = 100 \text{ kHz}$$

4.3 LC - Filter

Auch die Grenzfrequenz für das Filter konnte frei gewählt werden, musste aber im Bereich von 10 bis 20 kHz sein.

$$f_g = 15 \text{ kHz}$$

Die Induktivität der Spule wurde aufgrund der aktuellen Gegebenheiten und Vorhandensein der Bauteile gewählt.

$$L = 80 \mu\text{H}$$

Die benötigte Kapazität für das Filter 2. Ordnung wurde wie folgt berechnet.

$$f_g = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L * C}} \rightarrow C = \frac{1}{(2 * \pi * f_g)^2 * L}$$

$$C = \frac{1}{(2 * \pi * 15 \text{ kHz})^2 * 80 \mu\text{H}} = 1,4 \mu\text{F} \rightarrow C \cong 1 \mu\text{F}$$

Aufgrund der vorhandenen Bauteile wurde der Wert des Elektrolytkondensators von $1,4 \mu\text{F}$ auf $1 \mu\text{F}$ adaptiert.

5.2 Messergebnisse

Anmerkung: Durch die Bauteiltoleranzen des für die Dreiecksspannung verantwortlichen Kondensators (C1 - siehe 5.1) gab es leichte Abweichungen der Frequenz.

So entsprach die berechnete Frequenz von 100 kHz nicht ganz der gemessenen Frequenz ($\cong 77 \text{ kHz}$).

Durch die Rückrechnung der für die Frequenz verwendeten Formel in Punkt 4.2 mit der tatsächlichen Frequenz (f_{REAL}) konnte der tatsächliche Werte des Kondensators ermittelt werden.

$$f = \frac{I}{2 * C * \Delta U} \rightarrow C = \frac{I}{f_{\text{REAL}} * 2 * \Delta U} = \frac{1 \text{ mA}}{77 \text{ kHz} * 2 * 5 \text{ V}} \rightarrow C = 1,2987 \text{ nF}$$

So wurde eine Abweichung des Kondensators von 0,2987 nF festgestellt. Dies bedeutet eine Abweichung der Frequenz von ca. 23 kHz.

5.2.1 Pin 3 (NE555) - $U_3(t)$

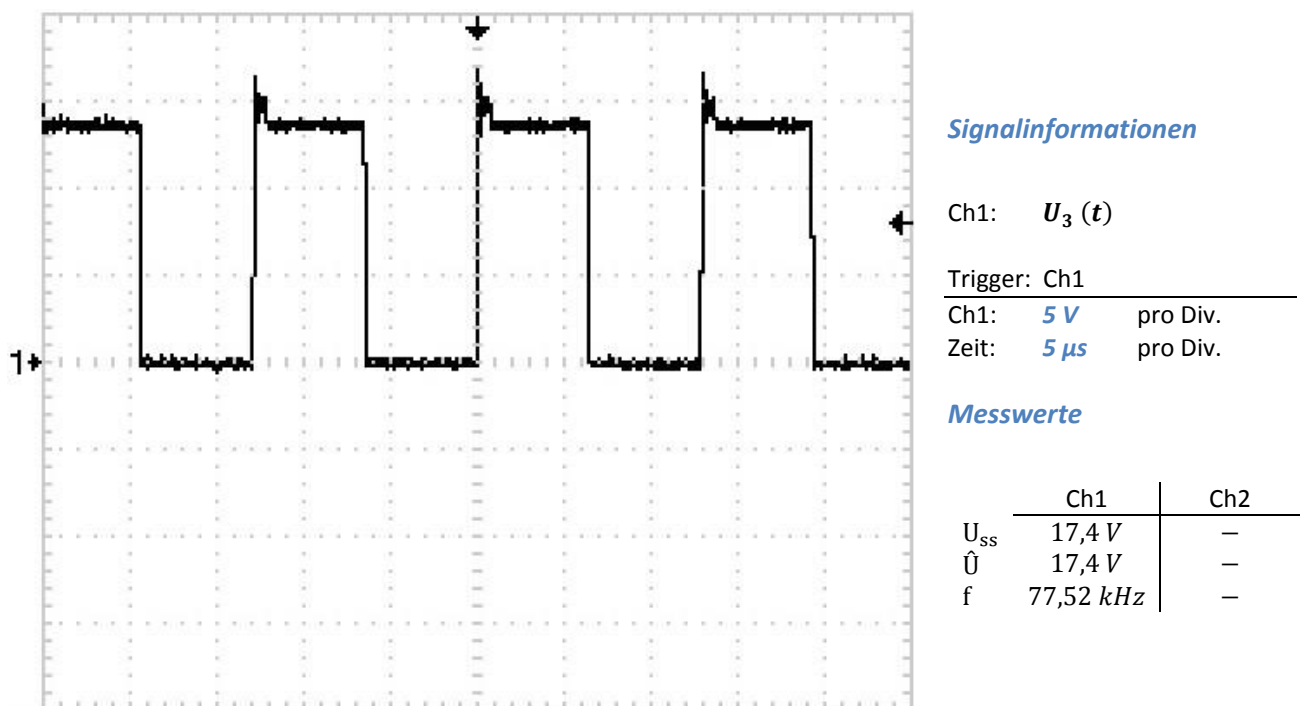


Abbildung 9. – Messung des Rechtecksignal am Pin 3 des NE555

5.2.2 Kondensator - $U_{\Delta}(t)$

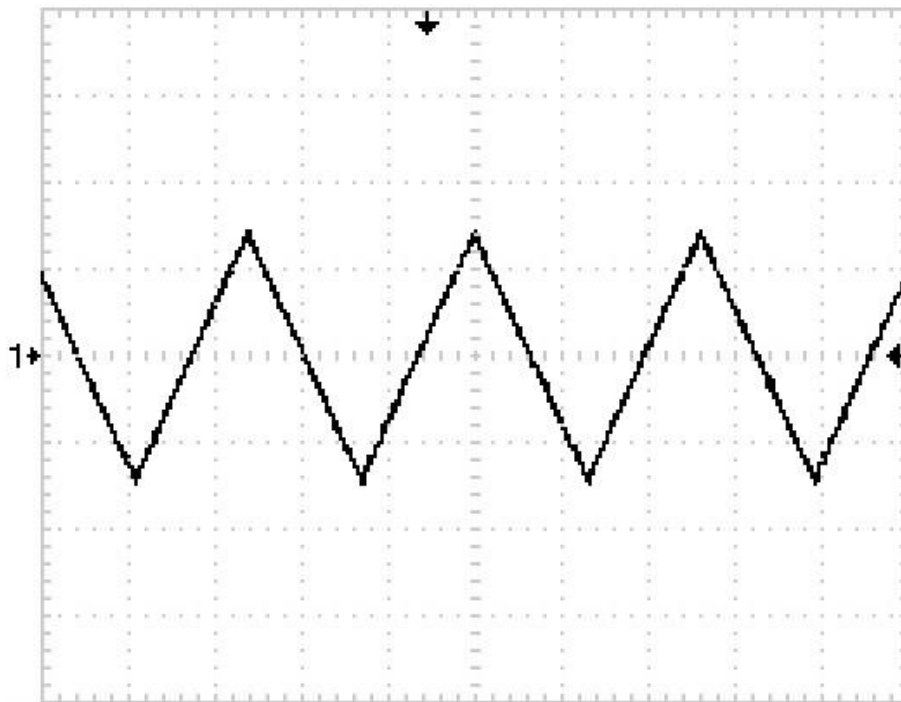


Abbildung 10. – Messung des Dreiecksignal am Kondensator C_{Δ}

Signalinformationen

Ch1: $U_{\Delta}(t)$

Trigger: Ch1

Ch1: **2 V** pro Div.

Zeit: **5 μ s** pro Div.

Messwerte

	Ch1	Ch2
U_{ss}	6 V	—
\hat{U}	3 V	—
f	76,69 kHz	—

5.2.3 Andere Messungen

Spannung an der (oberen) LED1: $U_{LED1} = 2,24 \text{ V}$

Spannung an der (unteren) LED2: $U_{LED2} = 2,18 \text{ V}$

Spannung am R_E : $U_E = 1,68 \text{ V}$

Anmerkung: Die Spannungen U_{LED1} und U_{LED2} sind annähernd gleich groß, da die beiden Basisströme vernachlässigbar klein sind.

Selbiges gilt auch für U_{RE1} und U_{RE2} , da der Treshold- und Trigger-Pin sehr hochohmig sind und so enorm kleine Ströme fließen.

6 PWM-Verstärker im Leerlauf

Alle folgenden Messungen wurden am unbelasteten PWM-Verstärker durchgeführt. Am Eingang wurde kein Signal eingespeist,

Die Offsetspannung am nicht-invertierenden Eingang des Komparators konnte mit dem Potentiometer ($P1$) adjustiert werden. Die Änderung dieser macht sich an der Symmetrie des PWM-Signals bemerkbar.

Der Widerstand des Potentiometers wurde so eingestellt, dass die negative und positive Rechteckwelle exakt gleich sind.

6.1 Messaufbau

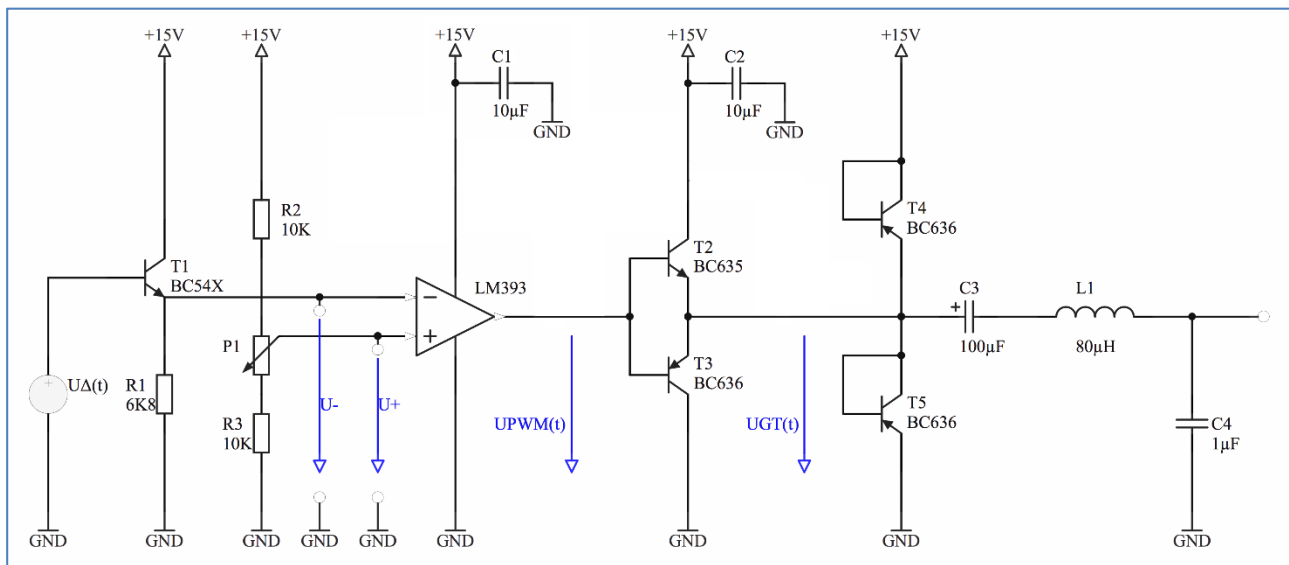
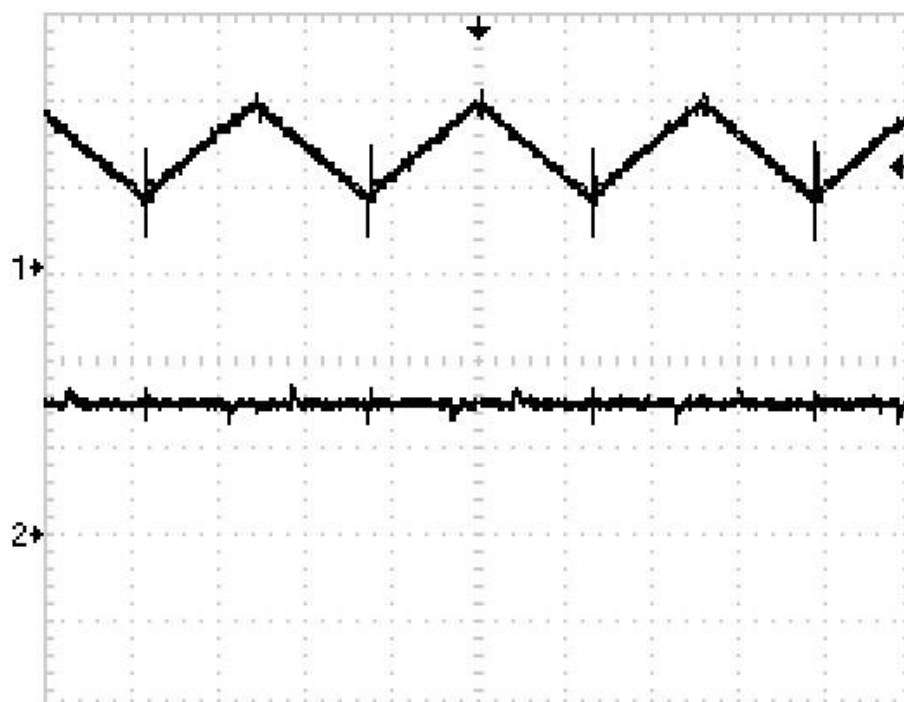


Abbildung 11. – Messaufbau des kompletten PWM-Verstärkers im Leerlauf

6.2 Messergebnisse

6.2.1 Komparator



Signalinformationen

Ch1: $U_-(t)$

Ch2: $U_+(t)$

Trigger: Ch1

Ch1: 5 V pro Div.

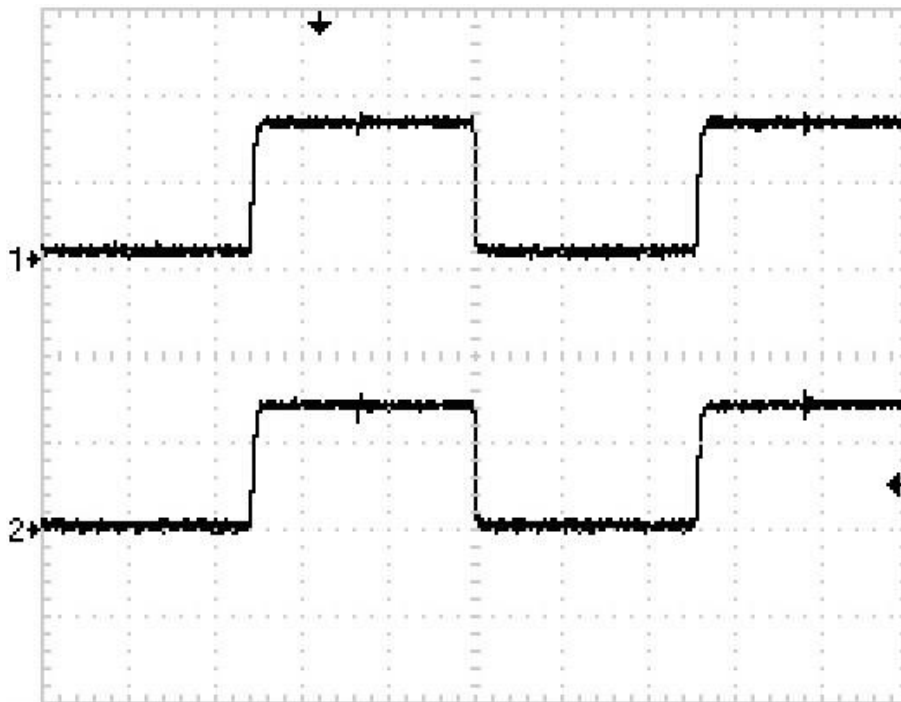
Ch2: 5 V pro Div.

Zeit: 5 µs pro Div.

Messwerte

	Ch1	Ch2
U_{SS}	13,87 V	2,13 V
\hat{U}	10,75 V	8,01 V
f	77,53 kHz	–

Abbildung 12. – Messungen an den Komparator-Eingängen der PWM-Stufe



Signalinformationen

Ch1: $U_{PWM}(t)$

Ch2: $U_{GT}(t)$

Trigger: Ch1

Ch1: **10 V** pro Div.

Ch2: **10 V** pro Div.

Zeit: **2,5 μs** pro Div.

Messwerte

	Ch1	Ch2
U_{ss}	17,2 V	16,0 V
\hat{U}	17,85 V	15,34 V
f	77,8 kHz	

Abbildung 13. – Messungen an den Transistoren der PWM-Stufe

7 PWM-Verstärker mit (Ersatz)last

7.1 Allgemeine Informationen

Die Messergebnisse der folgenden 3 Messungen (Aussteuerbarkeit, Linearität und Impulsverhalten) beruhen auf dem gleichen Messaufbau bzw. dem gleichen Messvorgang.

Das am Eingang des PWM-Verstärkers eingespeiste Signal wurde am Ausgang analysiert.

7.2 Aussteuerbarkeit

Unter Aussteuerbarkeit versteht man die maximale Amplitude an welcher das Signal noch seine ursprüngliche Form behält.

7.2.1 Messaufbau

Ch1: Eingangssignal **Ch2: Ausgangssignal**
Signal: Sinus
Amplitude: 2 V
Frequenz: 1 kHz

Die Aussteuerbarkeit wurde ermittelt indem für das zu speisende Signal ein Sinus mit der Frequenz von 1 kHz gewählt wurde. Die Amplitude wurde genau so gewählt dass das Ausgangssignal nicht übersteuert.

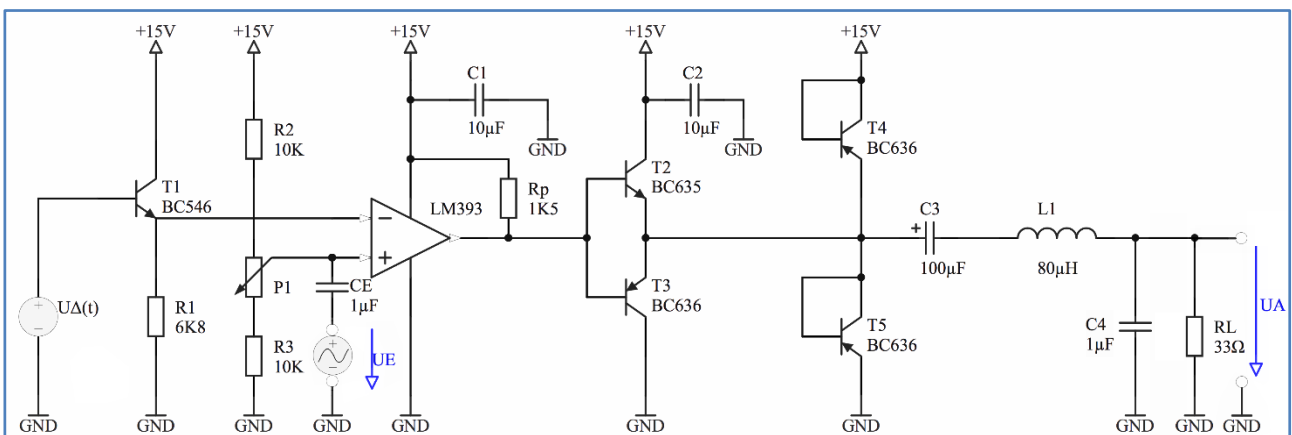
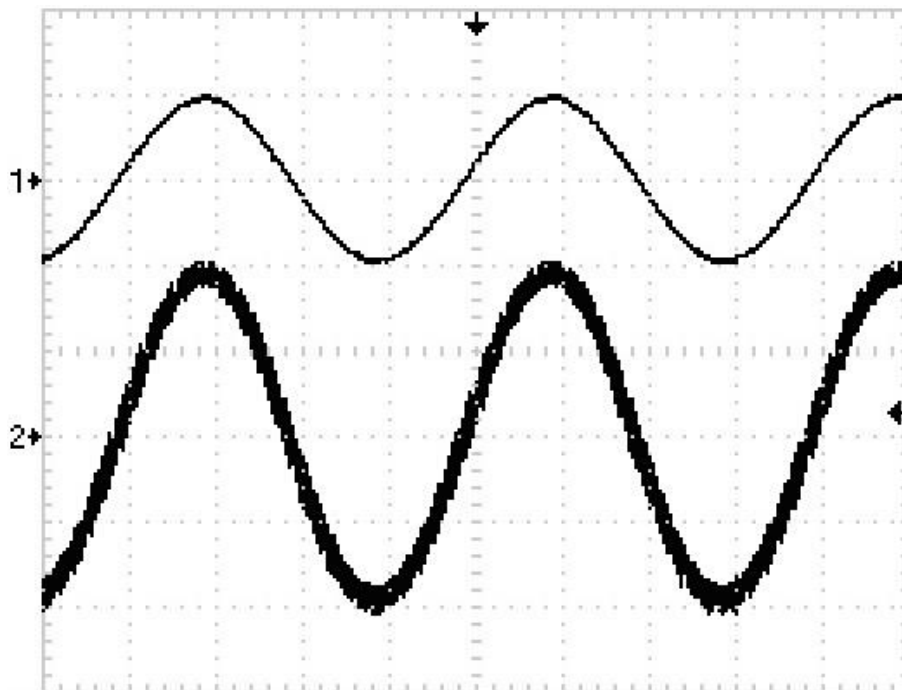


Abbildung 14. – Messaufbau des PWM-Verstärkers mit Ersatzlast zur Messung der Aussteuerbarkeit

7.2.2 Messergebnisse

Die Verstärkung V betrug 2,16 welche über folgende Formel berechnet wurde.

$$V = \frac{U_A}{U_E} = \frac{4,11 \text{ V}}{1,9 \text{ V}} \rightarrow V = 2,16$$



Signalinformationen

Ch1: $U_E(t)$

Ch2: $U_A(t)$

Trigger: Ch2

Ch1: 2 V pro Div.

Ch2: 2 V pro Div.

Zeit: 250 μs pro Div.

Messwerte

	Ch1	Ch2
U_{ss}	3,92 V	8,24 V
\hat{U}	1,9 V	4,11 V
f	1 kHz	

Abbildung 15. – Messung der Aussteuerbarkeit mithilfe eines Sinussignals

Anmerkung: Das Sinussignal zeigt am Ausgang deutliche Überlagerungen, obwohl das Eingangssignal ein nahezu perfekter Sinus war.

Eine Übersteuerung des Ausgangssignals war nicht zu erkennen, was auf die richtige Wahl von $\hat{U}_a (\cong 1V)$ zurückzuführen war.

Wäre diese zu groß gewählt worden, so kann die benötigte Spannung nicht mehr geliefert werden und eine deutliche Übersteuerung wäre zu erkennen.

7.3 Linearität

7.3.1 Messaufbau

Ch1: Eingangssignal
Signal: Dreieck
Amplitude: 2 V
Frequenz:
100 Hz - 10 kHz

Ch2: Ausgangssignal

Um die Linearität des PWM-Verstärkers zu messen wurde ein Dreieckssignal am Eingang des PWM-Verstärkers eingespeist.

Es wurden drei Dreieckssignale mit verschiedenen Frequenzen (100 Hz, 1 kHz, 10 kHz) mit der in Punkt 7.2 festgelegten Amplitude durchgeführt.

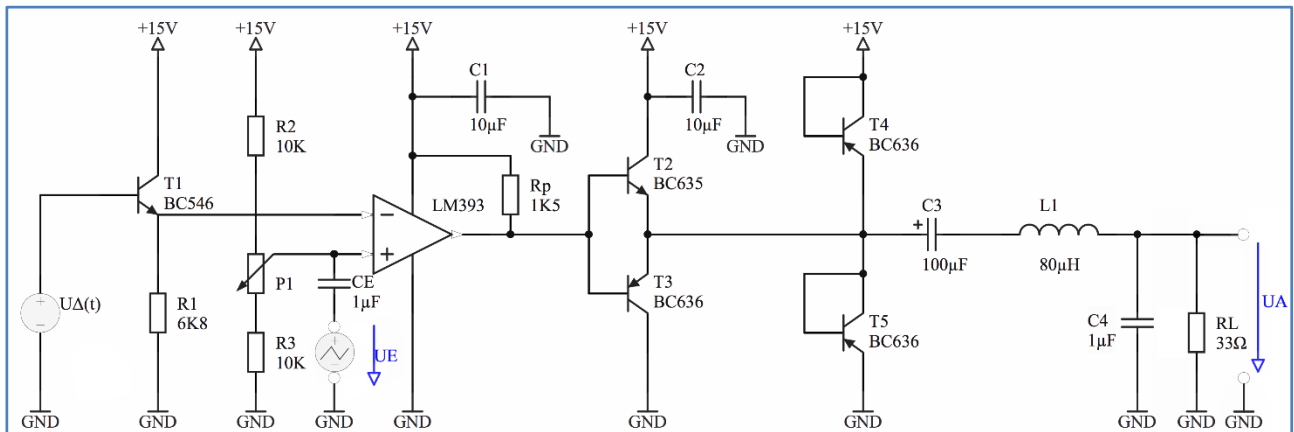
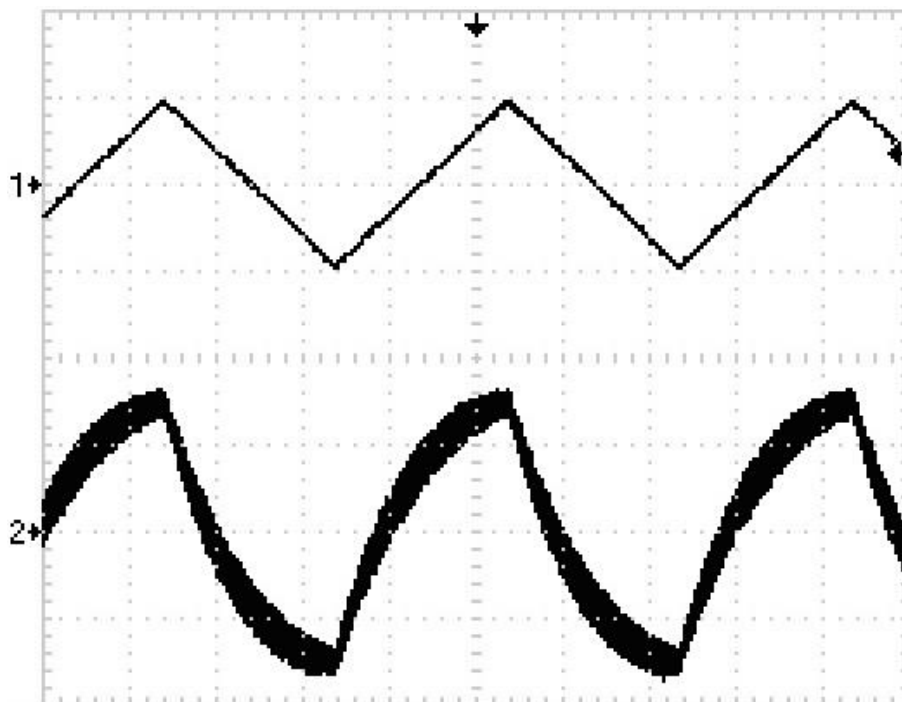


Abbildung 16. – Messaufbau des PWM-Verstärkers mit Ersatzlast zur Messung der Linearität

7.3.2 Messergebnisse (100 Hz)



Signalinformationen

Ch1: $U_E(t)$
Ch2: $U_A(t)$

Trigger: Ch1

Ch1: 2 V pro Div.
Ch2: 2 V pro Div.
Zeit: 2,5 ms pro Div.

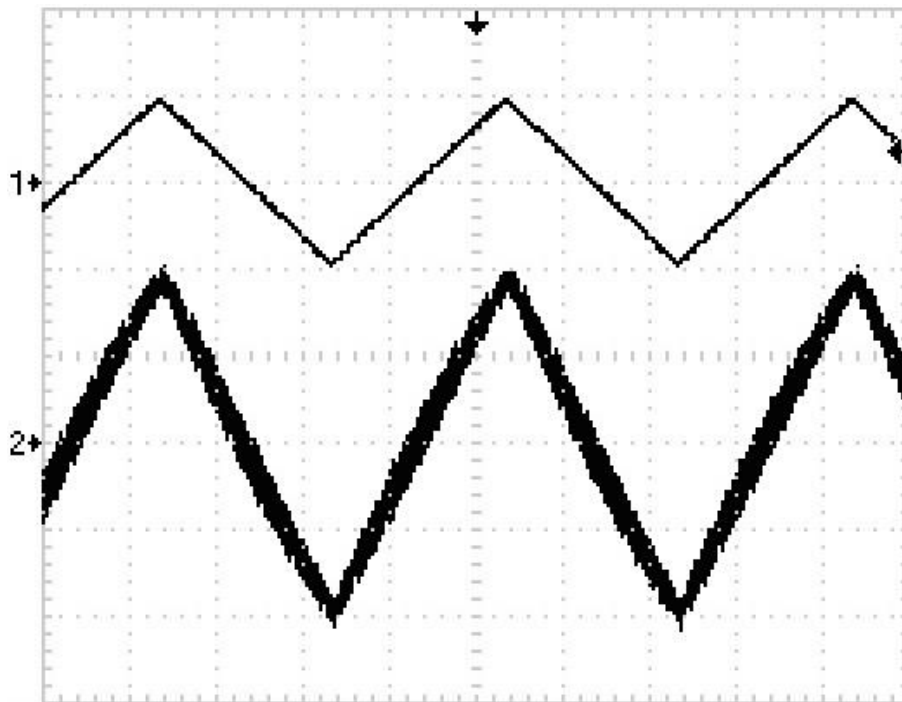
Messwerte

	Ch1	Ch2
U_{ss}	4 V	6,64 V
\hat{U}	2 V	3,31 V
f	100 Hz	

Abbildung 17. – Messung der Linearität mithilfe eines Dreieckssignals (100 Hz)

Anmerkung: Bei 100 Hz ist bereits eine deutlich erkennbare Nichtlinearität zu erkennen. Sehr schön zu sehen ist die leicht exponentielle Entladekurve, welche auf die nicht lineare Ladung des Kondensators C4 aufgrund der fehlenden Konstantstromquelle zurückzuführen ist.

7.3.3 Messergebnisse (1 kHz)



Signalinformationen

Ch1: $U_E(t)$

Ch2: $U_A(t)$

Trigger: Ch1

Ch1: 2 V pro Div.

Ch2: 2 V pro Div.

Zeit: 250 μ s pro Div.

Messwerte

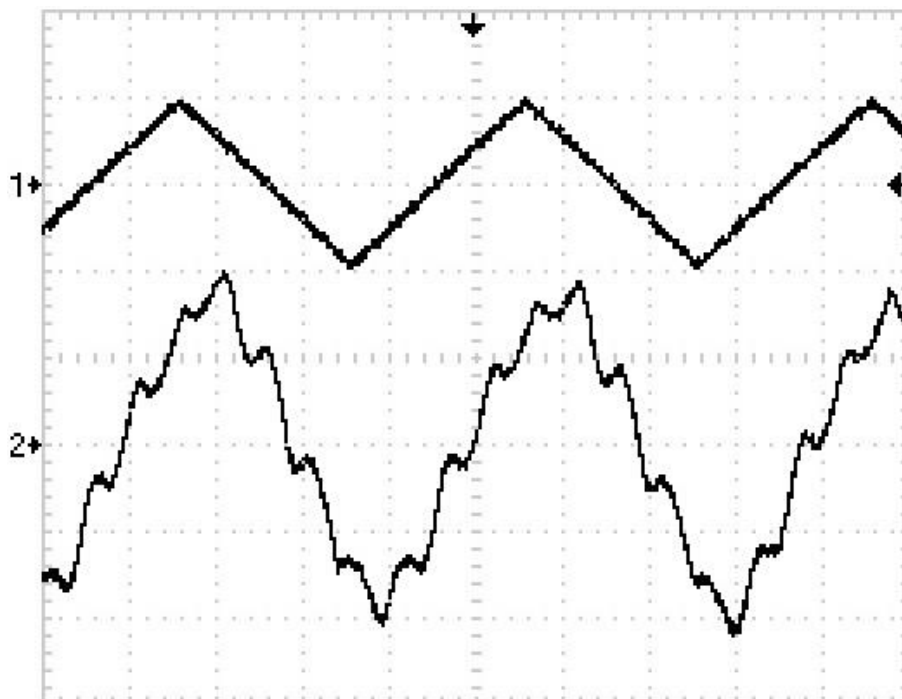
	Ch1	Ch2
U_{ss}	3,84 V	8,24 V
\hat{U}	1,98 V	4,1 V
f	1,003 kHz	

Abbildung 18. – Messung der Linearität mithilfe eines Dreiecksignals (1 kHz)

Anmerkung: Eine deutliche Verbesserung der Linearität bzw. eine nahezu optimale Linearität ist bereits bei 1 kHz zu sehen. Die PWM-Verstärker Schaltung arbeitet hier aufgrund der gewählten Frequenz optimal. Das am Eingang angelegte Dreiecksignal kommt wieder selbiger Form wieder am Ausgang bereitgestellt.

Die Verstärkung V beträgt hier 2,071 ($\frac{U_A}{U_E} = \frac{4,1 V}{1,98 V} \rightarrow V = 2,071$).

7.3.4 Messergebnisse (10 kHz)



Signalinformationen

Ch1: $U_E(t)$

Ch2: $U_A(t)$

Trigger: Ch1

Ch1: 2 V pro Div.

Ch2: 2 V pro Div.

Zeit: 25 μ s pro Div.

Messwerte

	Ch1	Ch2
U_{ss}	3,94 V	8,40 V
\hat{U}	2 V	4,21 V
f	10,021 kHz	

Abbildung 19. – Messung der Linearität mithilfe eines Dreiecksignals (10 kHz)

Anmerkung: Eine Linearität ist bei der gewählten Frequenz von 10 kHz nicht mehr zu erkennen. Das schlechte Ausgangssignal hat aufgrund diverser Überlagerungen sowie Einstreuungen oben sichtbare Signalform.

7.4 Impulsverhalten

7.4.1 Messaufbau

Ch1: Eingangssignal
Signal: Rechteck
Amplitude: 2 V
Frequenz:
100 Hz - 10 kHz

Ch2: Ausgangssignal

Um das Impulsverhalten des PWM-Verstärkers zu ermitteln, wurde der Verstärker mit einem Rechtecksignal gespeist.

Es wurden drei Rechtecksignale mit jeweils unterschiedlichen Frequenzen (100 Hz, 1 kHz, 10 kHz) mit der in Punkt 7.2 festgelegte Amplitude durchgeführt.

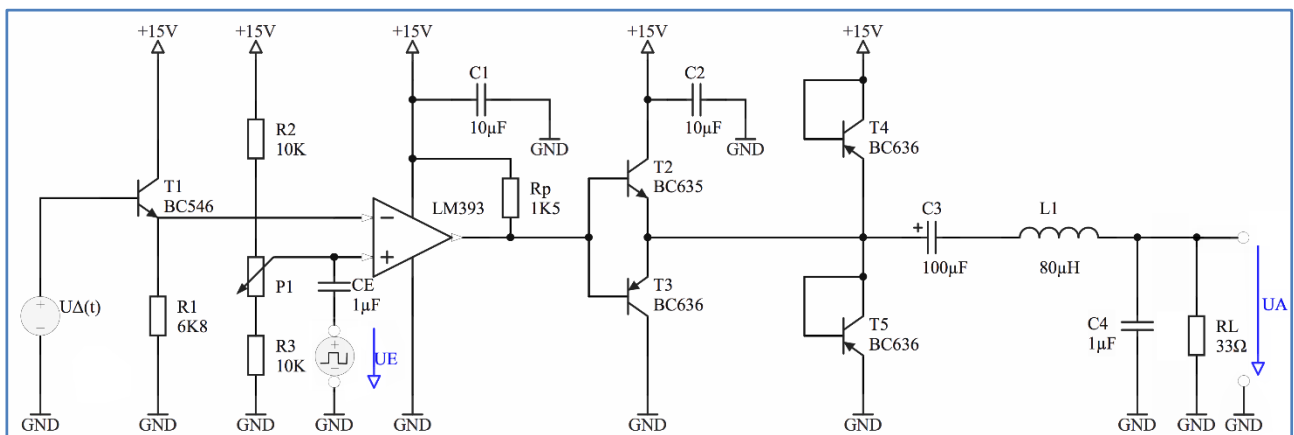
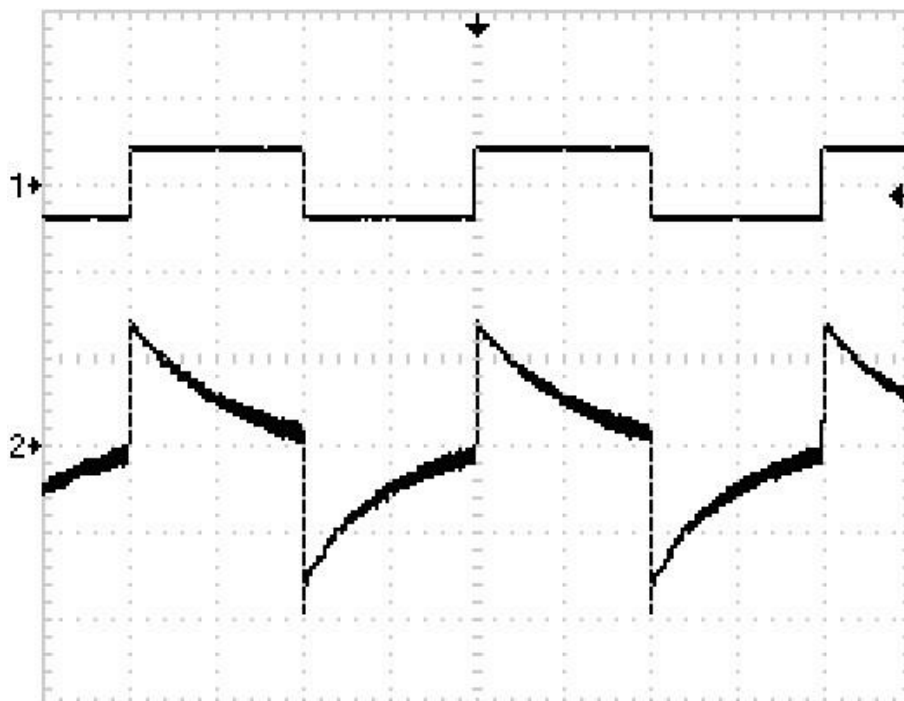


Abbildung 20. – Messaufbau des PWM-Verstärkers mit Ersatzlast zur Messung des Impulsverhalten

7.4.2 Messergebnisse (100 Hz)



Signalinformationen

Ch1: $U_E(t)$
Ch2: $U_A(t)$

Trigger: Ch1

Ch1: 5 V pro Div.
Ch2: 5 V pro Div.
Zeit: 2,5 ms pro Div.

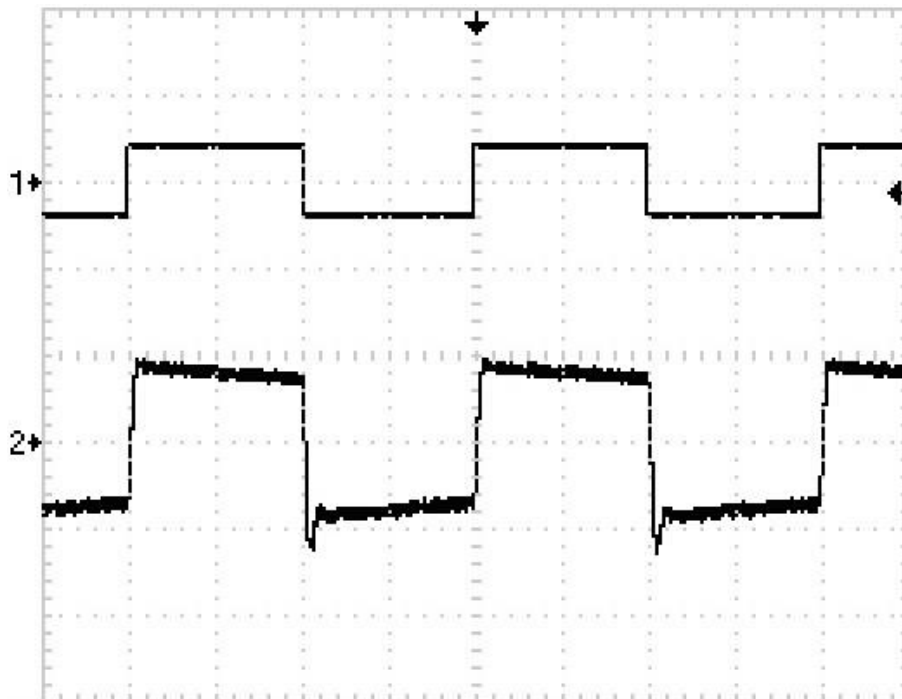
Messwerte

	Ch1	Ch2
U_{ss}	4,2 V	16,8 V
\hat{U}	2,1 V	8,39 V
f	100 Hz	

Abbildung 21. – Messung der Linearität mithilfe eines Rechtecksignals (100 Hz)

Anmerkung: Bei 100 Hz wird das schlechte Impulsverhalten des am Eingang angelegten Rechtecks hauptsächlich durch störende Transienten bei steigender und fallender Flanke verfälscht.

7.4.3 Messergebnisse (1 kHz)



Signalinformationen

Ch1: $U_E(t)$
Ch2: $U_A(t)$

Trigger: Ch1

Ch1: 5 V pro Div.
Ch2: 5 V pro Div.
Zeit: 250 μ s pro Div.

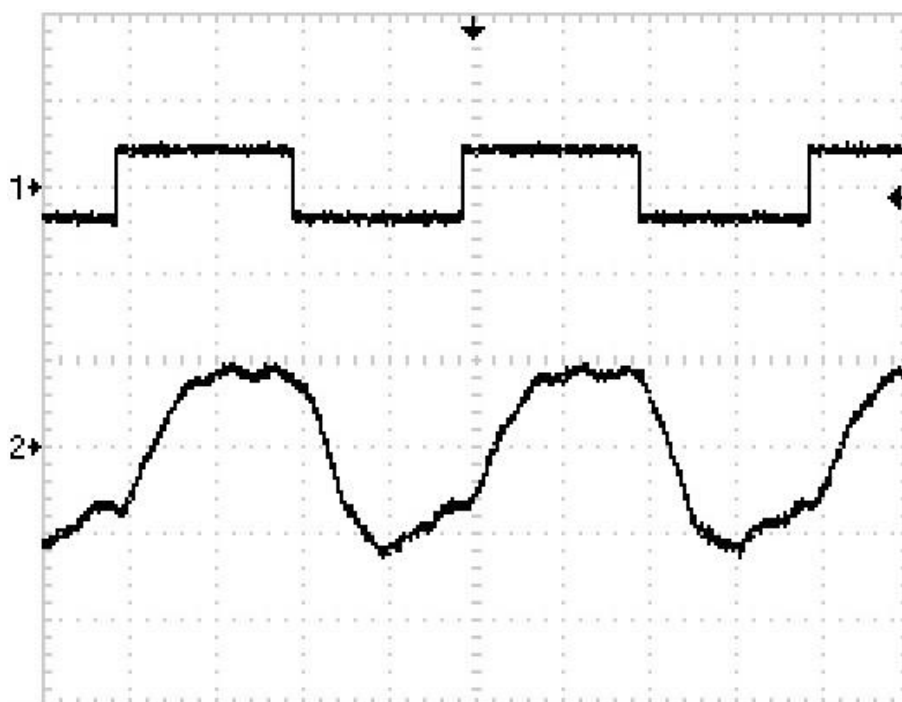
Messwerte

	Ch1	Ch2
U_{ss}	4,2 V	11 V
\hat{U}	2,1 V	5 V
f	1,0021 kHz	

Abbildung 22. – Messung der Linearität mithilfe eines Rechtecksignals (1 kHz)

Anmerkung: Wie bei vorhergehenden Messungen war das vorliegende Ergebnis auch hier bei 1 kHz nahezu optimal. Aber auch hier waren leichte Transienten, vor allem bei fallenden Flanken erkennbar.

7.4.4 Messergebnisse (10 kHz)



Signalinformationen

Ch1: $U_E(t)$
Ch2: $U_A(t)$

Trigger: Ch1

Ch1: 5 V pro Div.
Ch2: 5 V pro Div.
Zeit: 25 μ s pro Div.

Messwerte

	Ch1	Ch2
U_{ss}	4,8 V	11,4 V
\hat{U}	2,4 V	5,1 V
f	10,0139 kHz	

Abbildung 23. – Messung der Linearität mithilfe eines Rechtecksignals (10 kHz)

Anmerkung: Das Ausgangssignal bei 10 kHz *ähnelt* bei dieser Messung des Impulsverhalten eher einem Sinus als einem Rechteck.

Dies geschah dadurch, dass die Verarbeitung der hohen Frequenzen vom PWM-Verstärker nicht optimal geschah.

Enorm schnell fallende bzw. steigende Flanken konnten nicht so schnell erzeugt werden. Daher ist eher ein kurvenförmiger (langsamerer) Signalverlauf zu erkennen.

7.5 Dynamische Messungen

7.5.1 Messaufbau

Um alle Messpunkte in der Amplitude zu durchlaufen wurde ein Sinus in den PWM-Verstärker eingespeist. Die Ausgangsspannung und der Zeitunterschied der Nulldurchgänge beider Signale (Ein- und Ausgang) wurden dokumentiert.

Dieses Verfahren wurde für mehrere Frequenzen durchlaufen um einen vollständigen Frequenzgang von Amplitude und Phase zu erhalten.

Um die zuvor festgelegte bzw. berechnete Grenzfrequenz von 15 kHz herum, wurden, um die Genauigkeit an dieser Stelle zu erhöhen, mehrere Messungen durchgeführt.

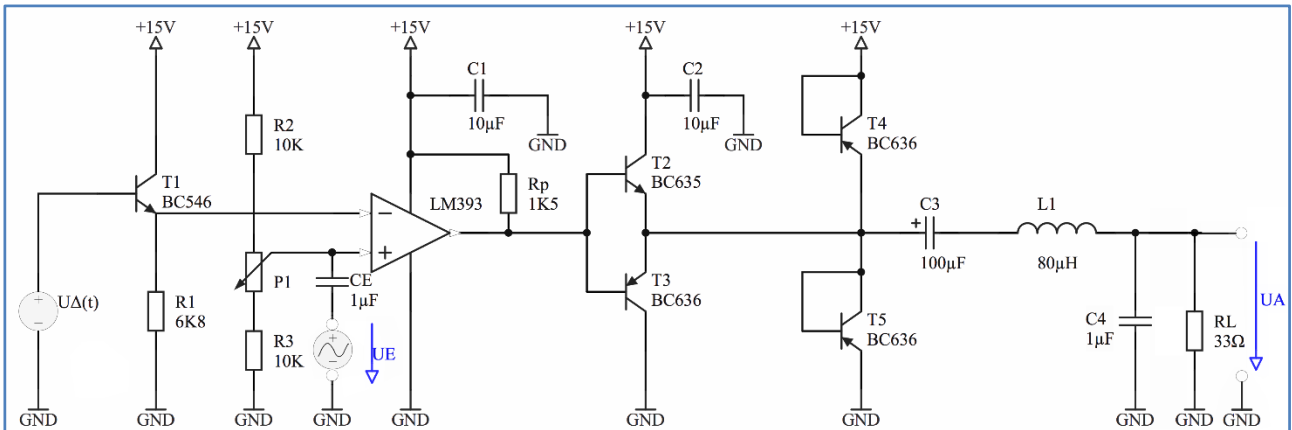


Abbildung 24. – Messaufbau zur Messung des Bodediagramms

7.5.2 Messergebnisse

Anschließend wurden Amplituden- und Phasengang jeweils in ein Diagramm eingezeichnet. Die x- Achse bildete hier beide Male die Frequenz in logarithmischer Skalierung.

7.5.2.1 Messwerttabelle

Frequenz	Ue	Ua	Δt	Phi	H (j ω)
5 Hz	1 V	0,13 V	-	-	-18 dB
10 Hz	1 V	0,41 V	-	-	-8 dB
20 Hz	1 V	1,65 V	-	-	4 dB
30 Hz	1 V	2,20 V	-	-	7 dB
50 Hz	1 V	2,27 V	-	-	7 dB
100 Hz	1 V	2,32 V	5,0E-6 s	-0,2 °	7 dB
1.000 Hz	1 V	2,50 V	5,0E-6 s	-1,8 °	8 dB
5.000 Hz	1 V	2,48 V	5,0E-6 s	-9,0 °	8 dB
10.000 Hz	1 V	2,44 V	8,0E-6 s	-28,8 °	8 dB
15.000 Hz	1 V	2,40 V	8,8E-6 s	-47,5 °	8 dB
20.000 Hz	1 V	2,20 V	9,0E-6 s	-64,8 °	7 dB
30.000 Hz	1 V	1,40 V	9,0E-6 s	-97,2 °	3 dB
40.000 Hz	1 V	0,82 V	9,0E-6 s	-129,6 °	-2 dB
50.000 Hz	1 V	0,50 V	8,5E-6 s	-153,0 °	-6 dB
60.000 Hz	1 V	0,32 V	7,9E-6 s	-170,6 °	-10 dB
70.000 Hz	1 V	0,20 V	7,0E-6 s	-176,4 °	-14 dB
80.000 Hz	1 V	0,11 V	6,3E-6 s	-181,4 °	-19 dB
90.000 Hz	1 V	0,05 V	5,6E-6 s	-181,4 °	-26 dB

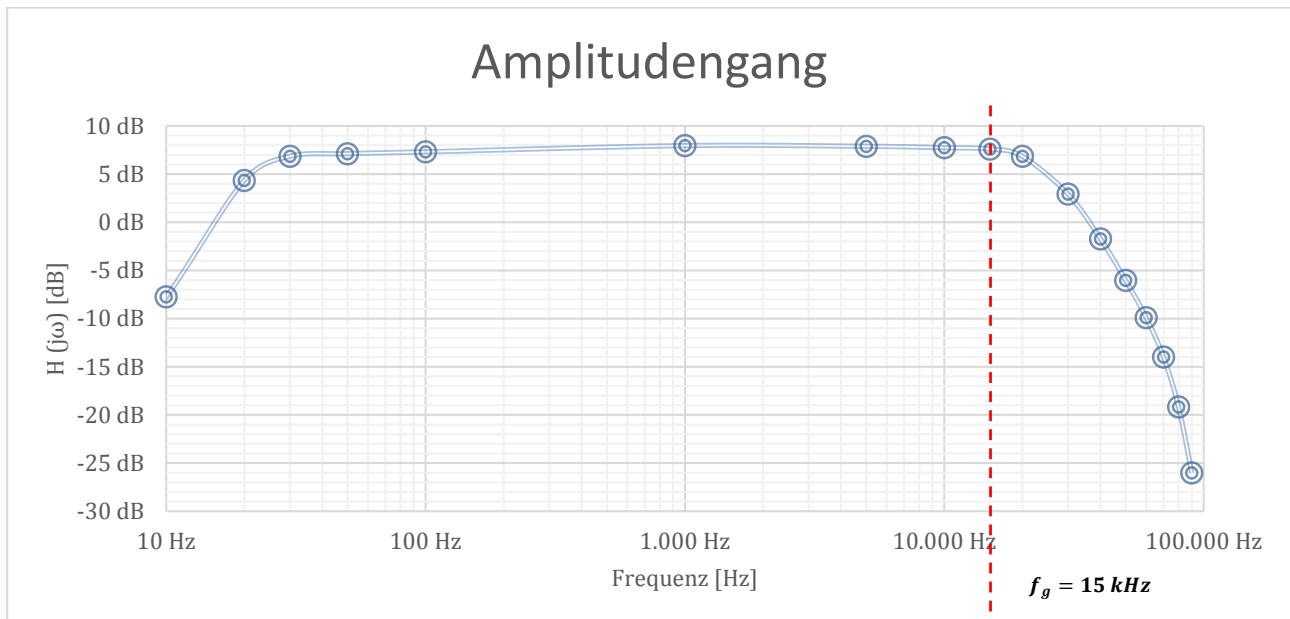


Abbildung 25. – Amplitudengang des Bodediagramms

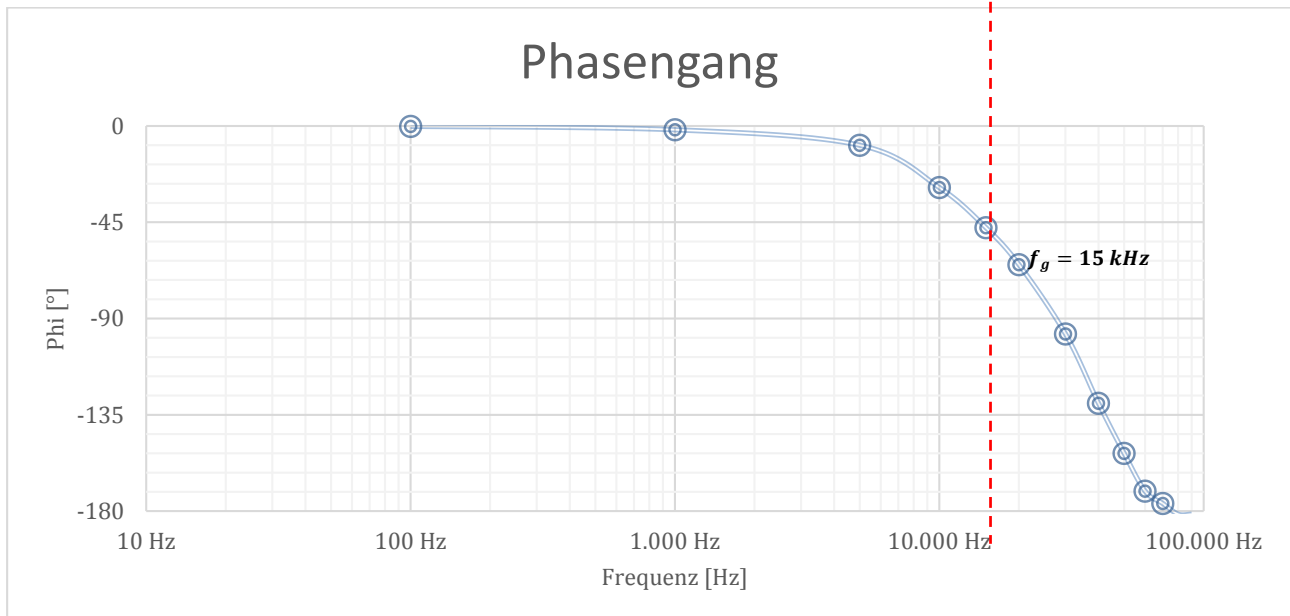


Abbildung 26. – Phasengang des Bodediagramms

Anmerkung: Im Bodediagramm sind nur tatsächlich gemessene Werte enthalten.

Da allerdings bei niedrigen Frequenzen zu viele, bzw. hauptsächlich nur Störsignale, Überlagerungen und Einstreuungen gemessen wurden, sind die Messergebnisse in diesen Bereichen ($\leq 100 \text{ Hz}$) teilweise unvollständig oder nicht vorhanden (Phasengang).

Die untere Grenzfrequenz ($\cong 20 \text{ Hz}$) konnte somit durch Messen nicht ermittelt werden.

8 PWM-Verstärker mit Bootstrapping

Beim Bootstrapping wird der Effekt ausgenutzt, dass Kondensatoren bei geringen Strömen ihre Spannung nur wenig ändern. Sie ziehen sozusagen eine Potentialänderung auf der einen Seite mit auf die andere, dies ist der sogenannte Bootstrap-Effekt.

Bei dieser PWM-Verstärker Schaltung wird dieses so ausgenutzt, dass die Ausgangsspannung mithilfe eines Kondensators auf den Eingang rückgekoppelt wird.

Diese Rückkopplung verursacht eine drastische Erhöhung des Eingangswiderstandes am Verstärker.

8.1.1 Messaufbau

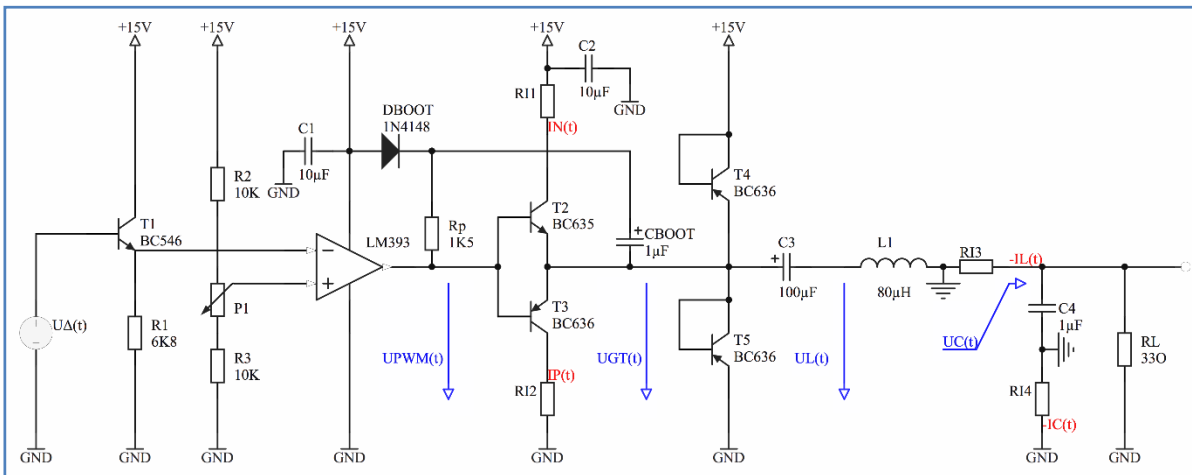


Abbildung 27. – Messaufbau für die Messungen der Bootstrapveränderungen

Die über den Koppelkondensator verbundenen Punkte (U_{PWM} und U_{GT}) ändern nun gleichzeitig ihr Potential (sollte es an einem Punkt zu einer Potentialänderung kommen).

Um Ströme und Spannungen zu gleichzeitig zu messen wurde der Strom über einen 1 Ohm Messwiderstand gemessen. Das Verhältnis von Strom zu Spannung lag so bei 1:1.

Eine gemeinsame Messmasse wurde zwischen Messobjekt und Messwiderstand platziert. Der so gemessene Strom war nun invertiert und musste anschließend am Oszilloskope wieder invertiert werden.

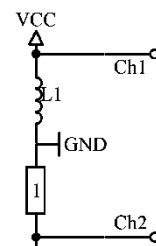
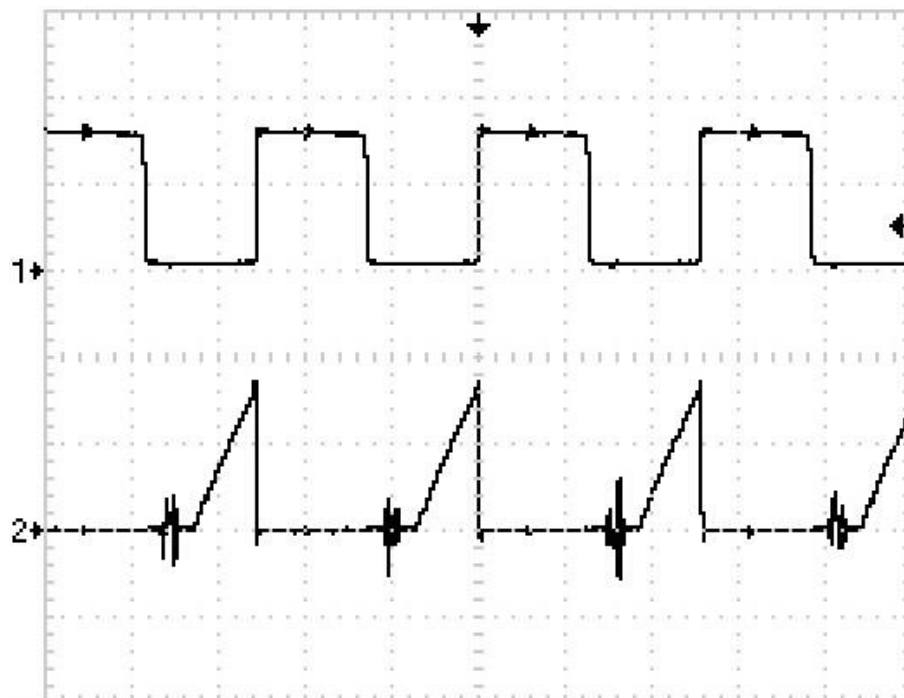


Abbildung 28. – Messschema

8.1.2 Messergebnisse (Leerlauf)

Im Vergleich mit den Leerlaufmessungen des Komparators unter Punkt 6.2.2 ist eine wesentliche Änderung des Signals an der Gegentaktstufe zu erkennen. Die fallenden und steigenden Flanken sind beim Bootstrap Signal $U_{GT}(t)$ wesentlich weniger steil und deutlich *spitzer*.

8.1.2.1 PWM-Stufe



Signalinformationen

Ch1: $U_{PWM}(t)$
Ch2: $I_P(t)$

Trigger: Ch1

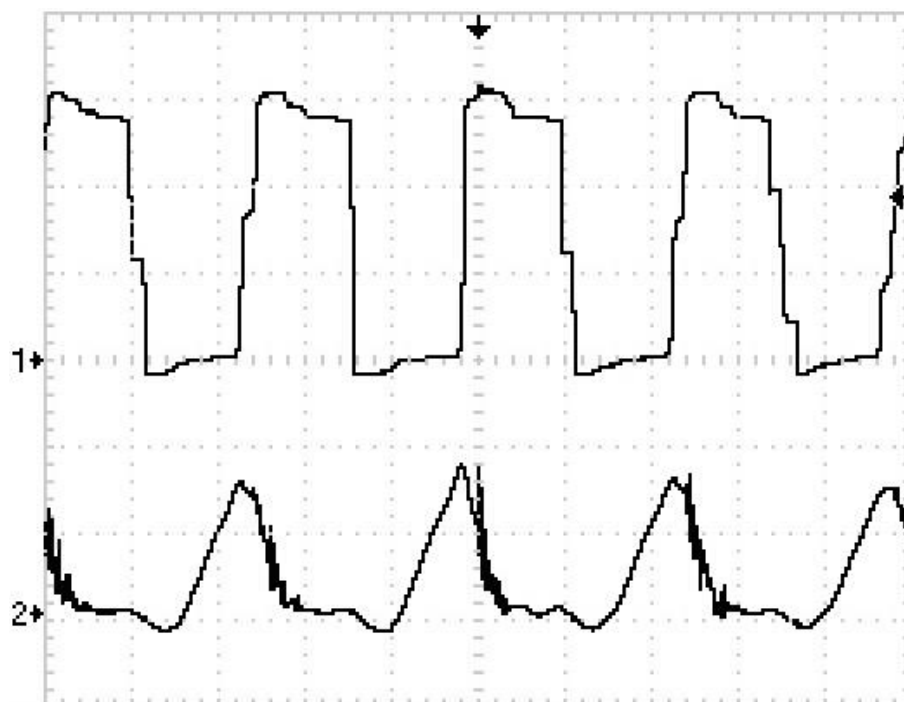
Ch1:	10 V	pro Div.
Ch2:	20 mA	pro Div.
Zeit:	5 μ s	pro Div.

Messwerte

	Ch1	Ch2
U_{ss}	16,4 V	—
\hat{U}	16,1 V	—
\hat{I}	—	36 mA
f	78,005 kHz	

Abbildung 29. – Bootstrapmessungen an der PWM-Stufe

8.1.2.2 Gegentaktstufe



Signalinformationen

Ch1: $U_{GT}(t)$
Ch2: $I_N(t)$

Trigger: Ch1

Ch1:	5 V	pro Div.
Ch2:	20 mA	pro Div.
Zeit:	5 μ s	pro Div.

Messwerte

	Ch1	Ch2
U_{ss}	16,6 V	—
\hat{U}	16,2 V	—
\hat{I}	—	37,6 mA
f	78,3 kHz	

Abbildung 30. – Bootstrapmessungen an der Gegentaktstufe

8.1.2.3 Spule

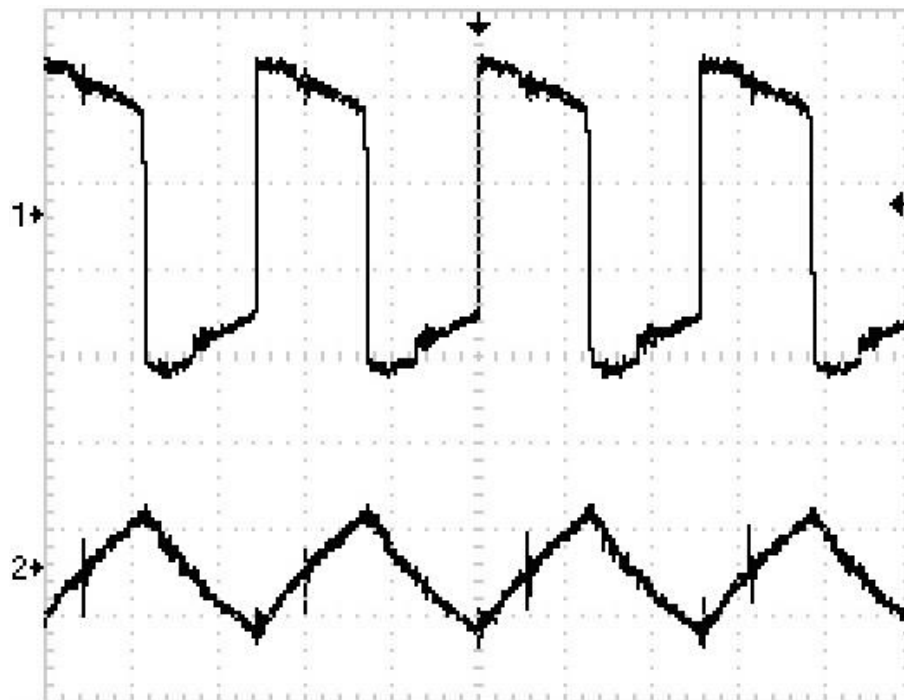


Abbildung 31. – Bootstrapmessungen an der Spule

Signalinformationen

Ch1: $U_L(t)$

Ch2: $I_L(t)$

Trigger: Ch1

Ch1: **5 V** pro Div.

Ch2: **50 mA** pro Div.

Zeit: **5 μs** pro Div.

Messwerte

	Ch1	Ch2
U_{ss}	18,8 V	—
\hat{U}	9,39 V	—
\hat{I}	—	36 mA
f	77,86 kHz	

8.1.2.4 Kondensator

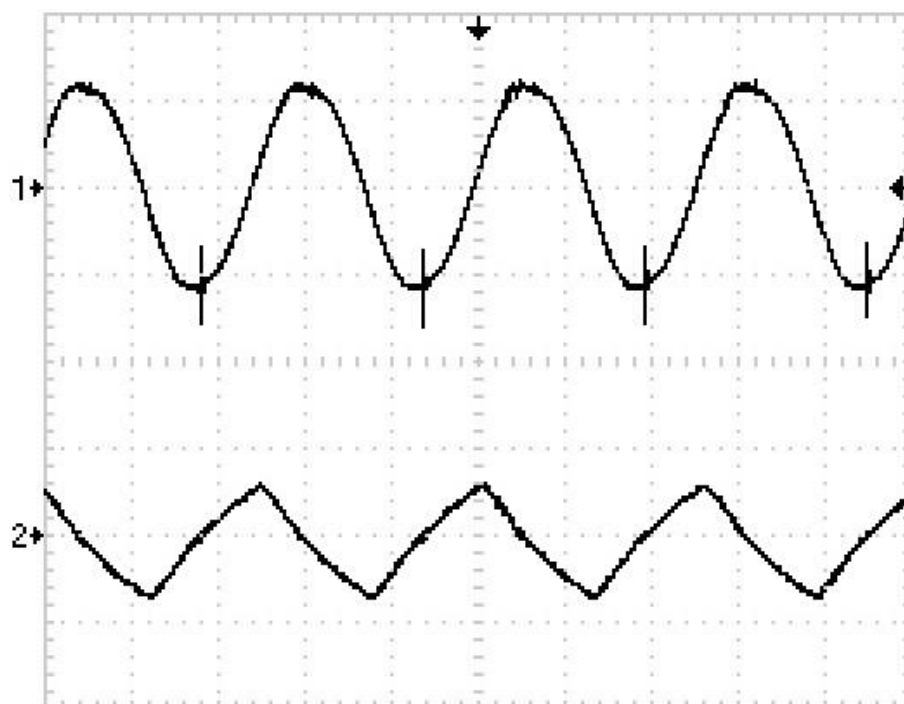


Abbildung 32. – Bootstrapmessungen am Kondensator

Signalinformationen

Ch1: $U_C(t)$

Ch2: $I_C(t)$

Trigger: Ch1

Ch1: **500 mV** pro Div.

Ch2: **50 mA** pro Div.

Zeit: **5 μs** pro Div.

Messwerte

	Ch1	Ch2
U_{ss}	1,2 V	—
\hat{U}	600 mV	—
\hat{I}	—	33mA
f	78,05 kHz	

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. – Schema eines PWM-Verstärkers	4
Abbildung 2. – Schema eines Dreiecksgenerators.....	5
Abbildung 3. – Praktische Realisierung des Dreiecksgenerators.....	5
Abbildung 4. – Schema einer PWM-Stufe	5
Abbildung 5. – Praktische Realisierung einer PWM-Stufe.....	6
Abbildung 6. – Praktische Realisierung einer PWM-Stufe.....	6
Abbildung 7. – RC-Tiefpass 2. Ordnung	7
Abbildung 8. – Messaufbau des Dreiecksgenerators (ohne Last)	9
Abbildung 9. – Messung des Rechtecksignal am Pin 3 des NE555	10
Abbildung 10. – Messung des Dreiecksignal am Kondensator $C\Delta$	11
Abbildung 11. – Messaufbau des kompletten PWM-Verstärkers im Leerlauf	12
Abbildung 12. – Messungen an den Komparator-Eingängen der PWM-Stufe	12
Abbildung 13. – Messungen an den Transistoren der PWM-Stufe	13
Abbildung 14. – Messaufbau des PWM-Verstärkers mit Ersatzlast zur Messung der Aussteuerbarkeit.....	14
Abbildung 15. – Messung der Aussteuerbarkeit mithilfe eines Sinussignals	15
Abbildung 16. – Messaufbau des PWM-Verstärkers mit Ersatzlast zur Messung der Linearität	16
Abbildung 17. – Messung der Linearität mithilfe eines Dreiecksignals (100 Hz)	16
Abbildung 18. – Messung der Linearität mithilfe eines Dreiecksignals (1 kHz)	17
Abbildung 19. – Messung der Linearität mithilfe eines Dreiecksignals (10 kHz)	17
Abbildung 20. – Messaufbau des PWM-Verstärkers mit Ersatzlast zur Messung des Impulsverhalten	18
Abbildung 21. – Messung der Linearität mithilfe eines Rechtecksignals (100 Hz).....	18
Abbildung 22. – Messung der Linearität mithilfe eines Rechtecksignals (1 kHz).....	19
Abbildung 23. – Messung der Linearität mithilfe eines Rechtecksignals (10 kHz).....	19
Abbildung 24. – Messaufbau zur Messung des Bodediagramms.....	20
Abbildung 25. – Amplitudengang des Bodediagramms	21
Abbildung 26. – Phasengang des Bodediagramms.....	21
Abbildung 27. – Messaufbau für die Messungen der Bootstrapveränderungen	22
Abbildung 28. – Messschema.....	22
Abbildung 29. – Bootstrapmessungen an der PWM-Stufe	23
Abbildung 30. – Bootstrapmessungen an der Gegentaktstufe	23
Abbildung 31. – Bootstrapmessungen an der Spule	24
Abbildung 32. – Bootstrapmessungen am Kondensator.....	24