



# Getakteter Abwärtswandler für Gleichspannung

Laurent Cohn <info@cohn.ch>  
Andrew Mustun <andrew@mustun.com>

31. Dezember 2002

Version 1.0

## **Abstract:**

Im EMT Labor soll ein getakteter Abwärtswandler, wie er von elektronischen Geräten verwendet wird, aufgebaut werden. In einem ersten Schritt wird ein Abwärtswandler mit konstantem Ausgangsstrom entwickelt. Dieser wird dann im zweiten Schritt durch einen Regler ergänzt, der für eine konstante Ausgangsspannung sorgt.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Aufgabenstellung</b>	<b>1</b>
<b>2 Projektmanagement</b>	<b>1</b>
2.1 Zeitplanung . . . . .	1
<b>3 Abwärtswandler ohne Regler</b>	<b>2</b>
3.1 Pflichtenheft . . . . .	2
3.2 Schaltungstopologie . . . . .	3
3.3 Schaltungsaufbau und Realisierung . .	4
3.4 Testaufbau . . . . .	8
3.5 Messreihen . . . . .	9
3.6 Messresultate . . . . .	9
3.7 Überprüfung des Ausgangsstroms . . .	10
3.8 Korrektur . . . . .	10
3.9 Linearisierung . . . . .	11
<b>4 Abwärtswandler mit Regler</b>	<b>12</b>
4.1 Pflichtenheft . . . . .	12
4.2 Schaltungstopologie . . . . .	13
4.3 Schaltungsaufbau und Realisierung . .	14
4.4 Fehlerabschätzung . . . . .	16
4.5 Testaufbau . . . . .	17
4.6 Messreihen . . . . .	18
4.7 Fehlerkorrekturen . . . . .	18
4.8 Berechnungen . . . . .	18
4.9 Messresultate . . . . .	19
4.10 Linearisierung . . . . .	19

4.11 Optimierungsmassnahmen . . . . .	20
<b>1 A Glossar</b>	<b>21</b>
<b>1 B Literatur</b>	<b>21</b>
<b>1 C Kommentar</b>	<b>22</b>
C.1 Lerneffekt . . . . .	22

## Abbildungsverzeichnis

1 Prinzipschema . . . . .	3
2 Blockschaltbild . . . . .	3
3 Realisierung des Schaltgliedes . . . . .	4
4 Funktionsprinzip eines PWM Signal Erzeugers . . . . .	5
5 Signalverlauf des PWM Signal Erzeugers	5
6 KO Output . . . . .	5
7 Realisierung des PWM . . . . .	6
8 Detailschema des Abwärtswandlers ohne Regler . . . . .	7
9 Testaufbau . . . . .	8
10 Prinzipschema . . . . .	13
11 Blockschaltbild . . . . .	13
12 Realisierung des PI-Reglers . . . . .	14
13 Detailschema des Abwärtswandlers mit Regler . . . . .	15
14 Testaufbau . . . . .	17
15 Wirkungsgrad der Schaltung in Abhängigkeit des Lastwiderstands . . .	19

## 1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des EMT Praktikums werden zwei verschiedene Versionen von getakteten Abwärtswandlern für Gleichspannung konstruiert und aufgebaut. Getaktete Abwärtswandler wandeln eine Eingangsspannung in eine niedrigere Ausgangsspannung um.

Der erste getaktete Abwärtswandler wird ohne Regler erstellt. Das heisst, die Ausgangsspannung kann zwar geregelt werden, hängt

aber auch von der Last und der momentanen Eingangsspannung ab.

Da in der praktischen Anwendung (zum Beispiel in einem elektronischen Gerät) eine konstante Spannung erwünscht ist, wird in einem zweiten Teilprojekt der Abwärtswandler durch einen Regler erweitert. Dieser hält die Ausgangsspannung konstant auf einem bestimmten Niveau.

## 2 Projektmanagement

### 2.1 Zeitplanung

28.03.2002 - 17.04.2002	Vorbereitung. Lesen der Aufgabenstellung und Theorie.
17.04.2002	Rechteck-Dreieck-PWM Schaltung aufbauen und testen. Getakteter Abwärtswandler dimensionieren, aufbauen und ausmessen. Alles Protokollieren.
17.04.2002 - 22.05.2002	PI-Regler dimensionieren. Dokumentation des Abwärtswandlers ohne Regler erstellen. Pflichtenheft für Abwärtswandler mit Regler erstellen.
14.05.2002	Sitzung: Standortbestimmung und Planung des weiteren Vorgehens.
22.05.2002	Realisierung und Einbau des PI-Reglers. Durchführung der Messreihen.
22.05.2002 - 29.05.2002	Fertigstellung der Dokumentation.
27.05.2002	Sitzung: Abschliessende Sitzung (Release Candidate)

## 3 Abwärtswandler ohne Regler

### 3.1 Pflichtenheft

#### 3.1.1 Kurzbeschreibung

Es soll ein Schaltnetzteil für Gleichspannung in Form eines getakteten Abwärtswandlers hergestellt werden. Die Ausgangsspannung muss nicht konstant sein. Das heisst, sie hängt von Last und Eingangsspannung ab.

#### 3.1.2 Technische Spezifikationen und Schnittstellen

- Eingangsspannung:  $U_e = 4...10Vdc$
- Betriebsspannung:  $U_b = 5...15Vdc$
- Ausgangsstrom:  $I_a \leq 300mA$
- Lastwiderstand:  $15\Omega \leq R_a \leq 200\Omega$ <sup>1</sup>
- Ripple:  $\leq 30mV$
- Taktfrequenz:  $\geq 20kHz$ <sup>2</sup>
- Betriebstemperatur:  $20^\circ C \pm 20^\circ C$

#### 3.1.3 Testprozeduren

Die Schaltung wird in den Grenzbereichen der zulässigen Eingangsspannung  $U_e$  sowie für einen Mittelwert getestet. werden. Diese Einstellung erfolgt an einem Potentiometer und wird mit einem Oszilloskop gemessen.

Um die Ausgangsspannung  $U_a$  zu verstellen muss das Tastverhältnis (Verhältnis zwischen Einschaltzeit und Periodendauer) verändert Am Ausgang werden der Ausgangsstrom  $I_a$  und die Ausgangsspannung  $U_a$  gemessen.

---

<sup>1</sup>Die untere Grenze des Lastwiderstands wurde aufgrund der Messresultate (siehe 3.5) festgelegt.

<sup>2</sup>20kHz entsprechen etwa der oberen menschlichen Hörgrenze [3]

### 3.2 Schaltungstopologie

#### 3.2.1 Prinzipschema

Der Abwärtswandler wandelt die angeschlossene Gleichstrom Eingangsspannung  $U_e$  in eine niedrigere Ausgangsspannung  $U_a$  um.  $U_a$  kann stufenlos zwischen  $0V$  und  $U_e$  reguliert werden.

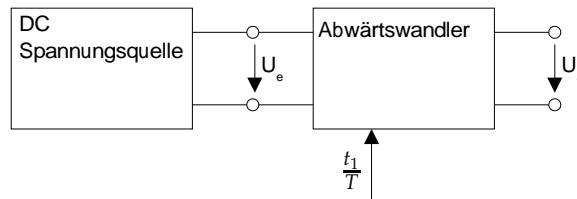


Abbildung 1: Prinzipschema

#### 3.2.2 Blockschaltbild

Aus einer DC Spannungsquelle werden mit hoher Frequenz über ein Schaltglied Energieportionen entnommen. Durch Veränderung des Verhältnisses zwischen Ein- und Ausschaltzeit des Schaltgliedes kann der mittlere Energiefluss bestimmt werden. Der Energiefluss der vom Schaltglied kommt wird mit einem Tiefpass geglättet (Abbildung 2). Am Ausgang kann eine Last angeschlossen werden. Dies kann zum Beispiel ein elektronisches Gerät sein, welches eine Betriebsspannung  $U_a$  verlangt.

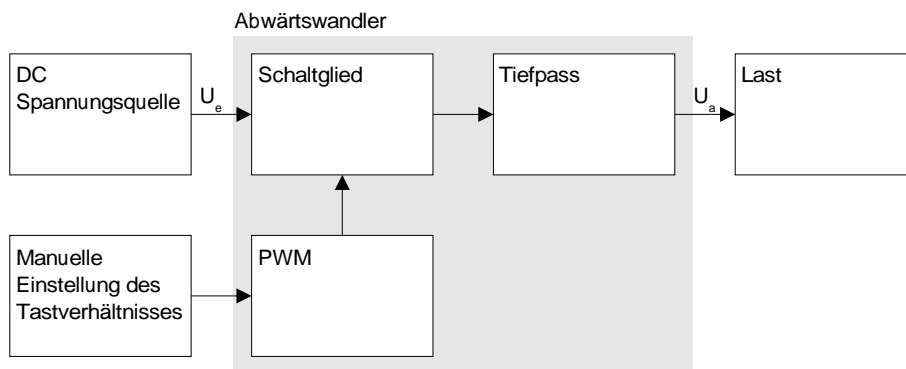


Abbildung 2: Blockschaltbild

### 3.3 Schaltungsaufbau und Realisierung

#### 3.3.1 Schaltglied für Energieentnahme

Das Schaltglied wird mit einem Schalttransistor  $T$  und einer Freilaufdiode  $D$  realisiert (Abbildung 3). Der **Transistor**  $T$  soll mit hoher Taktfrequenz Energieportionen aus der Eingangsspannungsquelle entnehmen. Der Energiefluss kann durch Veränderung des Verhältnisses zwischen Einschalt-

zeit und Ausschaltzeit reguliert werden. Dieses Schaltverhältnis wird mittels eines **PWM** Signal Erzeugers eingestellt (siehe auch Kapitel 3.3.2).

Bemerkung: Der verwendete Transistor  $T$  leitet von  $S$  nach  $D$ , wenn am Schalteingang  $G$  **kein** Signal vorhanden ist.

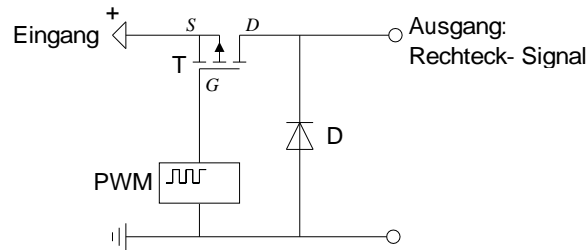


Abbildung 3: Realisierung des Schaltgliedes

### 3.3.2 PWM Signalerzeugung

Für die Schaltung des Transistors zur Energieentnahme wird ein Rechtecksignal mit einstellbarem Verhältnis zwischen Ein- und Ausschaltzeit benötigt (siehe Kapitel 3.3.1). Für die Erzeugung eines solchen Signals kann ein PWM Signal Erzeuger verwendet werden. PWM steht für Pulse Width Modulation (Puls Breiten Modulierung).

nung) verglichen. Immer wenn die Spannung des Dreiecksignals grösser ist als die Referenzspannung, erhält man am Ausgang ein Signal.

Durch Änderung der Referenzspannung lässt sich das Verhältnis zwischen Ausschaltdauer und Periodendauer  $\frac{t_1}{T}$  verändern (Abbildung 5).

Abbildung 4 zeigt das Prinzip des PWM Signal Erzeugers: Ein Dreiecksignal wird mit einem Spannungsniveau (Referenzspan-

Bemerkung: Die Ausschaltzeit  $t_1$  des PWM Signal Erzeugers entspricht der Einschaltzeit des Schaltgliedes.

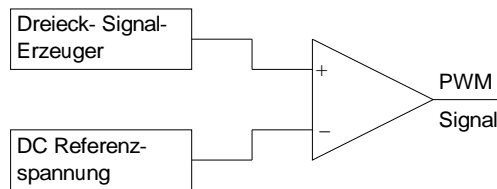


Abbildung 4: Funktionsprinzip eines PWM Signal Erzeugers

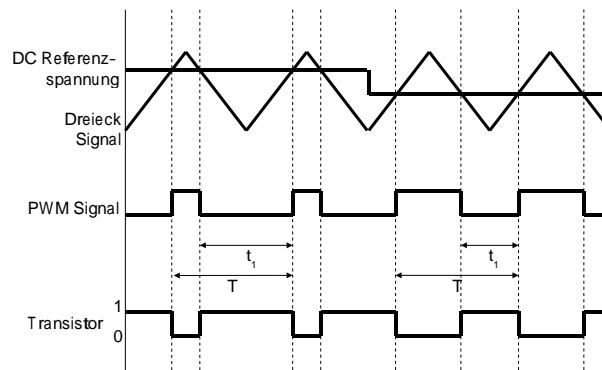


Abbildung 5: Signalverlauf des PWM Signal Erzeugers

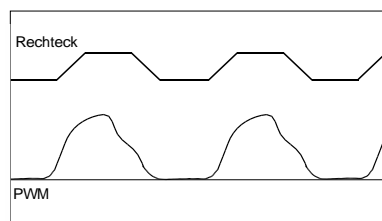


Abbildung 6: KO Output

Abbildung 7 zeigt das Detailschema eines PWM Signal Erzeugers. Der Rechteck-Dreieck-Oszillator (in der Abbildung rechts) wird für die Erzeugung einer Annäherung an ein **Dreiecksignal** (Ausgang in der Mitte) eingesetzt.

Das Dreiecksignal entsteht durch die Lade-/Entladekurve des **Kondensators**  $C_1$  und ist deshalb aus Teilen der e-Funktion aufgebaut. Als Eingangssignal für den Komparator ist das Signal jedoch ausreichend.

Der **Komparator** links im Schema vergleicht eine Referenz Spannung mit dem Dreieck Signal. Die Referenzspannung kann am **Potentiometer**  $P$  reguliert werden. Immer wenn die Spannung des Dreiecksignals am invertierenden Eingang des Operationsverstärkers höher ist als die eingestellte Referenzspannung am nicht-invertierenden Eingang des Operationsverstärkers, ist am Ausgang "PWM" ein Signal vorhanden.

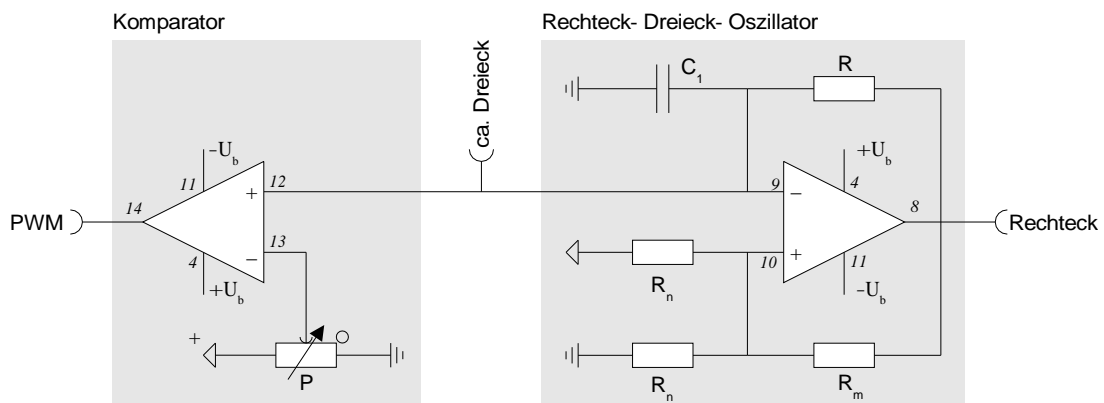


Abbildung 7: Realisierung des PWM

### 3.3.3 Bauteile für den PWM Signal Erzeuger

Anzahl	Symbol	Wert	Bauteil / Typ	Toleranz
2			Operationsverstärker LM324	-
1	$P$	100k $\Omega$	Potentiometer, ZHW-Nr. EH.5.02.35	Hoch (Ablesegenauigkeit)
1	$R$	10k $\Omega$	Widerstand	$\pm 1\%$
1	$R_m$	22k $\Omega$	Widerstand	$\pm 1\%$
2	$R_n$	47k $\Omega$	Widerstand	$\pm 1\%$
1	$C_1$	1nF	Kondensator	-

### 3.3.4 Detailschema

Das Detailschema des Abwärtswandlers (Abbildung 8) umfasst sämtliche Komponenten des Wandlers: Spannungsquelle, PWM Signal Erzeuger mit Rechteck-Dreieck Oszillator und Komparator, Schaltglied, Tiefpass und Lastwiderstand am Ausgang.

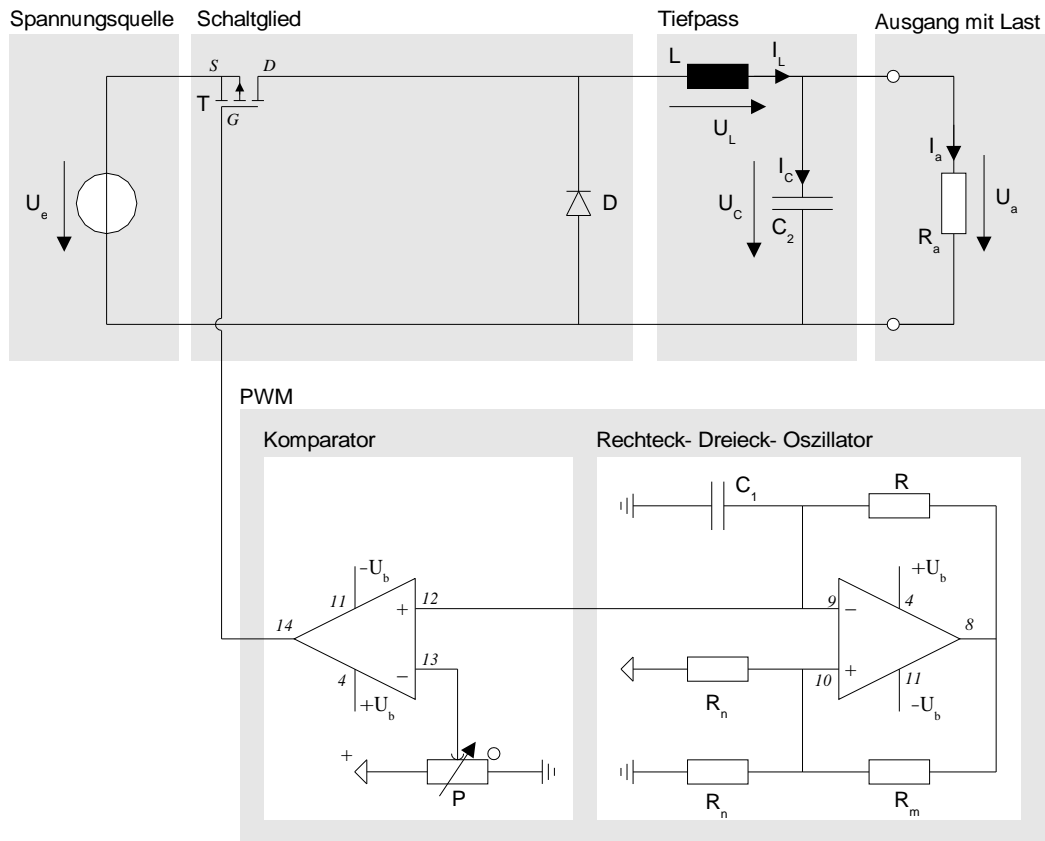


Abbildung 8: Detailschema des Abwärtswandlers ohne Regler

### 3.3.5 Bauteile für den Abwärtswandler

Anzahl	Symbol	Wert	Bauteil / Typ	Toleranz
1	$T$		Transistor / R9520	
1	$L$	$1000\mu H$	Spule	
1	$C_2$	$2200\mu F$	Kondensator	
1	$R_a$	$10, 22, 39, 82k\Omega$	Last-Widerstände	$\pm 10\%$
1	$D$		Diode / 1N4004	

Die Bauteile des PWM Signal Erzeugers sind im Kapitel 3.3.3 aufgelistet.

### 3.4 Testaufbau

Abbildung 9 zeigt den schematischen Testaufbau mit dem die Messungen durchgeführt werden.

Am Speisegerät werden die gewünschten Eingangsspannungen eingestellt und am Messgerät  $V_1$  abgelesen. Mit dem Potentiometer  $P$  kann das Verhältnis zwischen Ein- und Ausschaltzeit des Schaltgliedes eingestellt werden. Dieses Verhältnis wird mit dem Oszilloskop  $Z$  nach dem Schaltglied erfasst

und am Bildschirm des Oszilloskops abgelesen.

Mit den Messgeräten  $V_2$  und  $A_2$  werden Ausgangsspannung und -strom gemessen. Die Ausgangsspannung  $U_a$  ist die relevante Messgrösse, weshalb (aus Sicht des Abwärtswandlers) mit einer Stromfehlerschaltung gemessen wird. Der Ausgangsstrom  $I_a$  wird bezüglich des spezifizierten Höchstwertes von  $300mA$  kontrolliert.

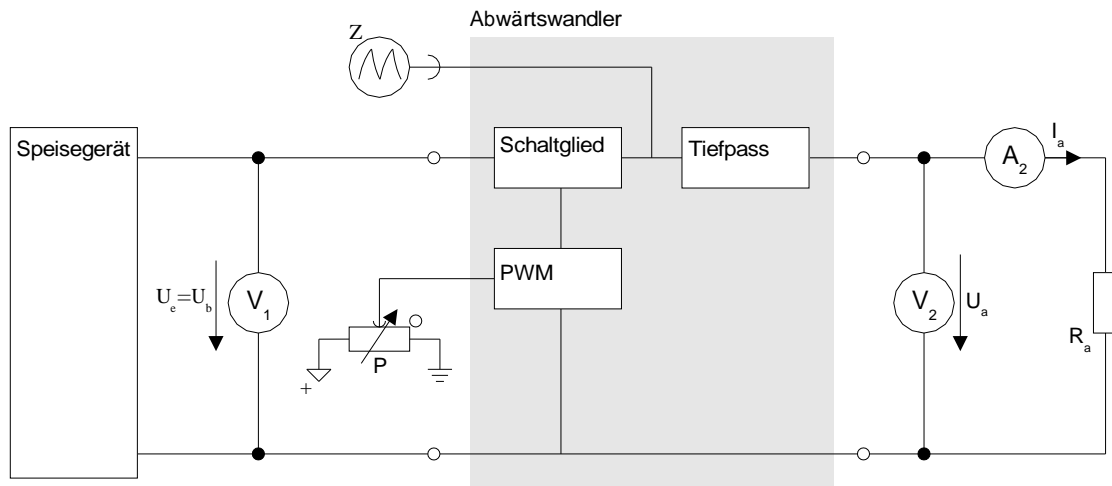


Abbildung 9: Testaufbau

#### 3.4.1 Angaben für Messgeräte

Symbol	Gerät	Nummer	Messbereich	Toleranz
$V_1$	Voltmeter	ABB Metrawatt M2012, ZHW-Nr. EH.103.53	10V	$\pm(0.25\% + 1D.)$
$V_2$	Voltmeter	ABB Metrawatt M2012, ZHW-Nr. EH.103.44	10V	$\pm(0.25\% + 1D.)$
$A_2$	Amperemeter	ABB Metrawatt M2012, ZHW-Nr. EH.103.58	1A	$\pm(1.25\% + 1D.)$
$Z$	Oszilloskop			

### 3.5 Messreihen

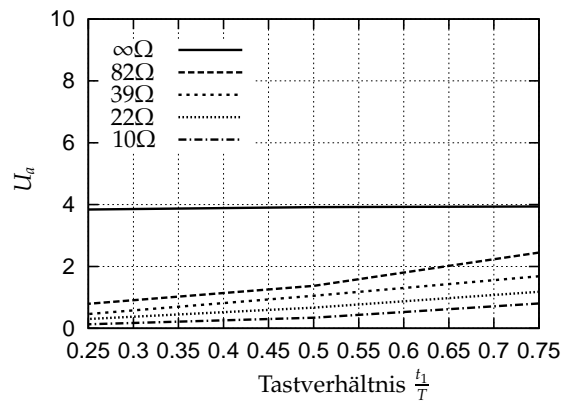
In den Messreihen wird die Ausgangsspannung  $U_a$  als Funktion der Eingangsspannung  $U_e$ , dem Tastverhältnis  $\frac{t_1}{T}$  ( $t_1$ : Einschaltzeit,  $T$ : Periodendauer) und dem Lastwiderstand  $R_a$  erfasst.

Gemessen wird mit den Eingangsspannungen  $4V$ ,  $7V$  und  $10V$ . Die Ausgangsspannung  $U_a$  wird für jede Eingangsspannung als Funktion der Lastwiderstände  $10\Omega$ ,  $22\Omega$ ,  $39\Omega$ ,  $82\Omega$  und  $\infty\Omega$  (keine Last angeschlossen) sowie der Tastverhältnisse  $0.25$ ,  $0.5$  und  $0.75$  dargestellt.

### 3.6 Messresultate

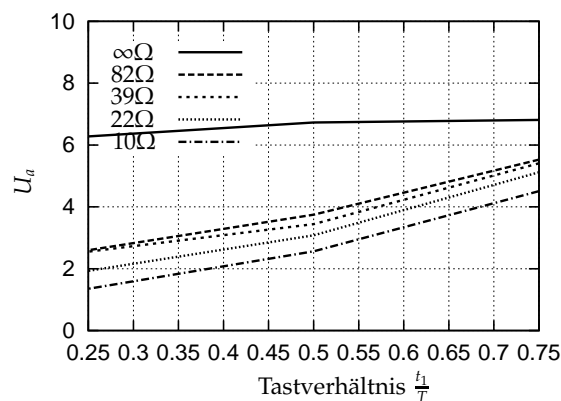
#### 3.6.1 Messwerte für $U_a$ bei $U_e = 4V$

$\frac{t_1}{T}$	$10\Omega$	$22\Omega$	$39\Omega$	$82\Omega$	$\infty\Omega$
0.75	0.80	1.18	1.68	2.45	3.94
0.50	0.34	0.67	1.05	1.37	3.92
0.25	0.13	0.30	0.46	0.79	3.84



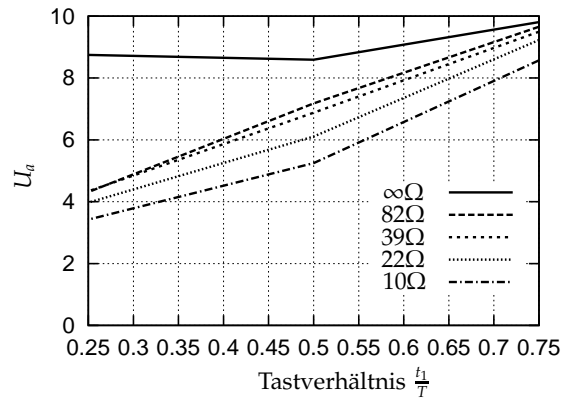
#### 3.6.2 Messwerte für $U_a$ bei $U_e = 7V$

$\frac{t_1}{T}$	$10\Omega$	$22\Omega$	$39\Omega$	$82\Omega$	$\infty\Omega$
0.75	4.51	5.12	5.41	5.53	6.81
0.50	2.56	3.08	3.44	3.75	6.73
0.25	1.35	1.93	2.55	2.60	6.28



3.6.3 Messwerte für  $U_a$  bei  $U_e = 10V$

$\frac{t_1}{T}$	10Ω	22Ω	39Ω	82Ω	∞Ω
0.75	8.57	9.23	9.50	9.66	9.81
0.50	5.25	6.11	6.88	7.18	8.59
0.25	3.42	3.97	4.34	4.31	8.75



3.7 Überprüfung des Ausgangsstroms

Der Ausgangsstrom  $I_a$  darf laut Spezifikation 300mA nicht überschreiten. Dies ist jedoch für die nebenstehenden Werte der Fall.

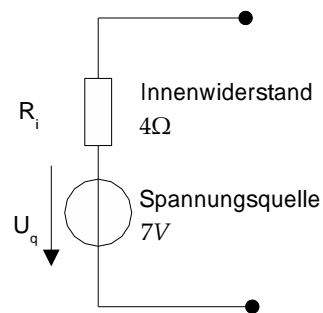
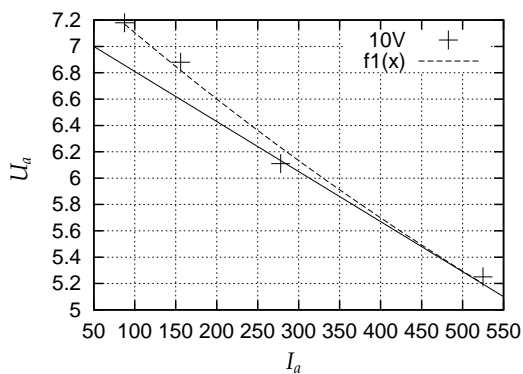
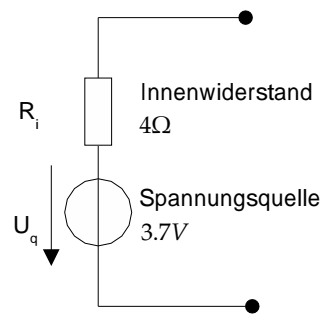
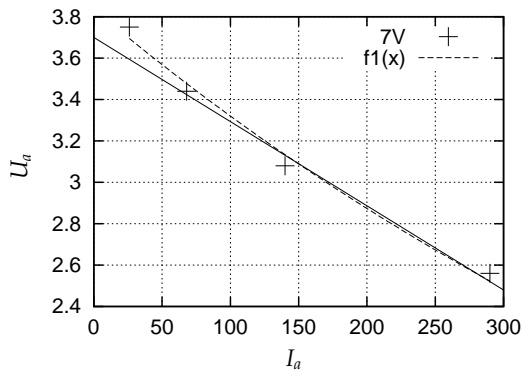
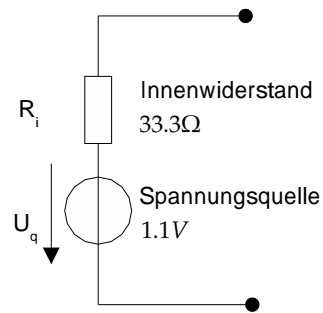
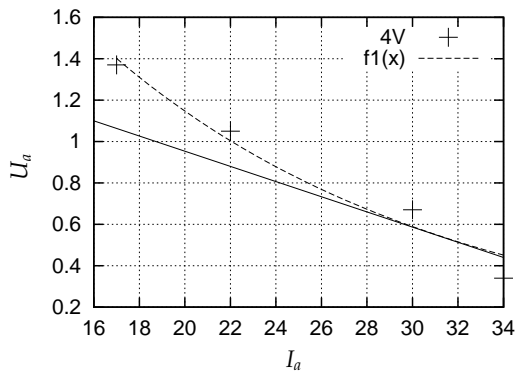
$U_e$	$\frac{t_1}{T}$	$R_a$
7V	> 0.75	10Ω
10V	> 0.5	10Ω

3.8 Korrektur

Die untere Grenze für den Wert des Lastwiderstands wird als Konsequenz dieser Messungen im Pflichtenheft als 15Ω spezifiziert (siehe 3.1).

### 3.9 Linearisierung

Aufgrund der Messresultate für Ausgangsspannung und -strom werden im Folgenden die linearen Ersatzschaltungen ermittelt. In den Diagrammen werden die an die Messwerte angenäherte Funktion  $f(x)$ , die Messwerte selbst und die linearisierte Gerade visualisiert.



## 4 Abwärtswandler mit Regler

### 4.1 Pflichtenheft

#### 4.1.1 Kurzbeschreibung

Der getaktete Abwärtswandler ohne Regler aus Kapitel 3 wird durch einen PI-Regler ergänzt. Damit wird erreicht, dass die Ausgangsspannung unabhängig von der Last und der Eingangsspannung konstant 3V beträgt.

#### 4.1.2 Technische Spezifikationen und Schnittstellen

- Eingangsspannung:  $U_q = 4...10Vdc$
- Betriebsspannung:  $U_b = 5...15Vdc$
- Ausgangsspannung: konstant  $U_A = 3Vdc$
- Ausgangsstrom:  $I_A = 300mA$

#### 4.1.3 Testprozeduren

Die Schaltung wird auf Stabilität getestet. Für verschiedene Eingangsspannungen insbesondere im Randbereich sowie für verschiedene Lastwiderstände wird überprüft, ob sich die Ausgangsspannung immer auf die geforderten 3Vdc einpendelt.

## 4.2 Schaltungstopologie

### 4.2.1 Prinzipschema

Der geregelte Abwärtswandler wandelt die angeschlossene Gleichstrom Eingangsspannung  $U_e$  in eine konstante niedrigere Ausgangsspannung  $U_a$  um. Die Ausgangsspannung hat als Rücksignal einen direkten Einfluss auf die Schaltung des geregelten Abwärtswandlers. Die Schaltung kann auf äussere Einflüsse reagieren und Spannungsschwankungen am Eingang sowie Lastveränderungen am Ausgang ausgleichen.

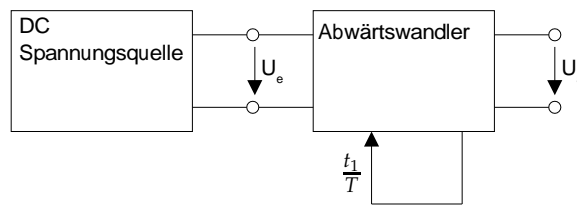


Abbildung 10: Prinzipschema

### 4.2.2 Blockschaltbild

Im Blockschaltbild ist der Unterschied zum unregulierten Abwärtswandler gut ersichtlich. Der PI-Regler bildet das Glied für die Rückkopplung (Feedback) des Ausgangssignals in das System. Damit kann das Verhalten der Schaltung von der Ausgangsspannung abhängig gemacht werden. Der PI-Regler regelt das Tastverhältnis so, dass die Ausgangsspannung  $U_a$  fortlaufend dem Sollwert  $U_s$  angenähert wird.

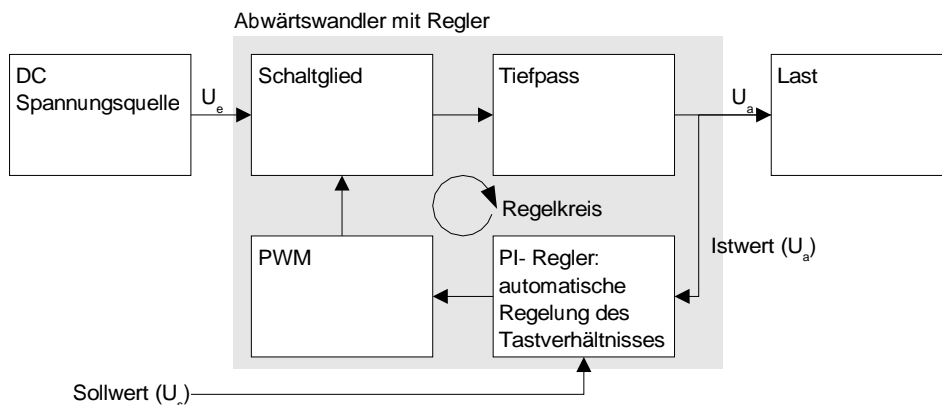


Abbildung 11: Blockschaltbild

### 4.3 Schaltungsaufbau und Realisierung

#### 4.3.1 Schaltglied für Energieentnahme

Das Schaltglied wird ohne Änderung vom Abwärtswandler ohne Regler übernommen (siehe Kapitel 3.3.1).

#### 4.3.2 PI Regler

Die Ausgangsspannung des PI-Reglers  $U_2$  läuft hoch, wenn die Spannung  $U_a'$  kleiner ist als die interne Referenzspannung  $U_{ref}$ . Der PI-Regler vergleicht also eine tatsächliche Spannung (Ist-Spannung) mit einer Referenzspannung (Soll-Spannung). Die Verstärkung der Differenz muss in der Gesamtschaltung eine entsprechende Regulierung bewirken, sodass sich  $U_a$  der Referenzspannung  $U_{ref}$  annähert.

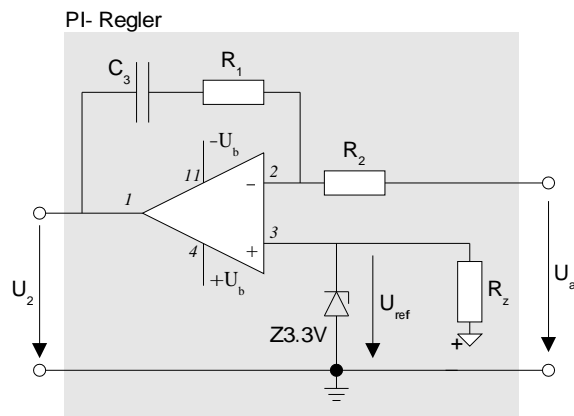


Abbildung 12: Realisierung des PI-Reglers

#### 4.3.3 Bauteile für den PI-Regler

Anzahl	Symbol	Wert	Bauteil / Typ	Toleranz
1			Operationsverstärker / LM324	
1	$C_3$	$1\mu F$	Kondensator / 1K63	
1	Z	3.3V	Diode / 1N 47 28A 541	
1	$R_1$	$2.2k\Omega$	Widerstand	1%
1	$R_2$	$10k\Omega$	Widerstand	1%
1	$R_z$	$100\Omega$	Widerstand	1%

4.3.4 Detailschema

Abbildung 13 zeigt das Detailschema des Abwärtswandlers mit Regler. Dieses Schema umfasst sämtliche Komponenten des Wandlers: Spannungsquelle, PWM Signal Erzeuger mit Rechteck-Dreieck Oszillator und Komparator, PI-Regler, Schaltglied, Tiefpass und Lastwiderstand am Ausgang.

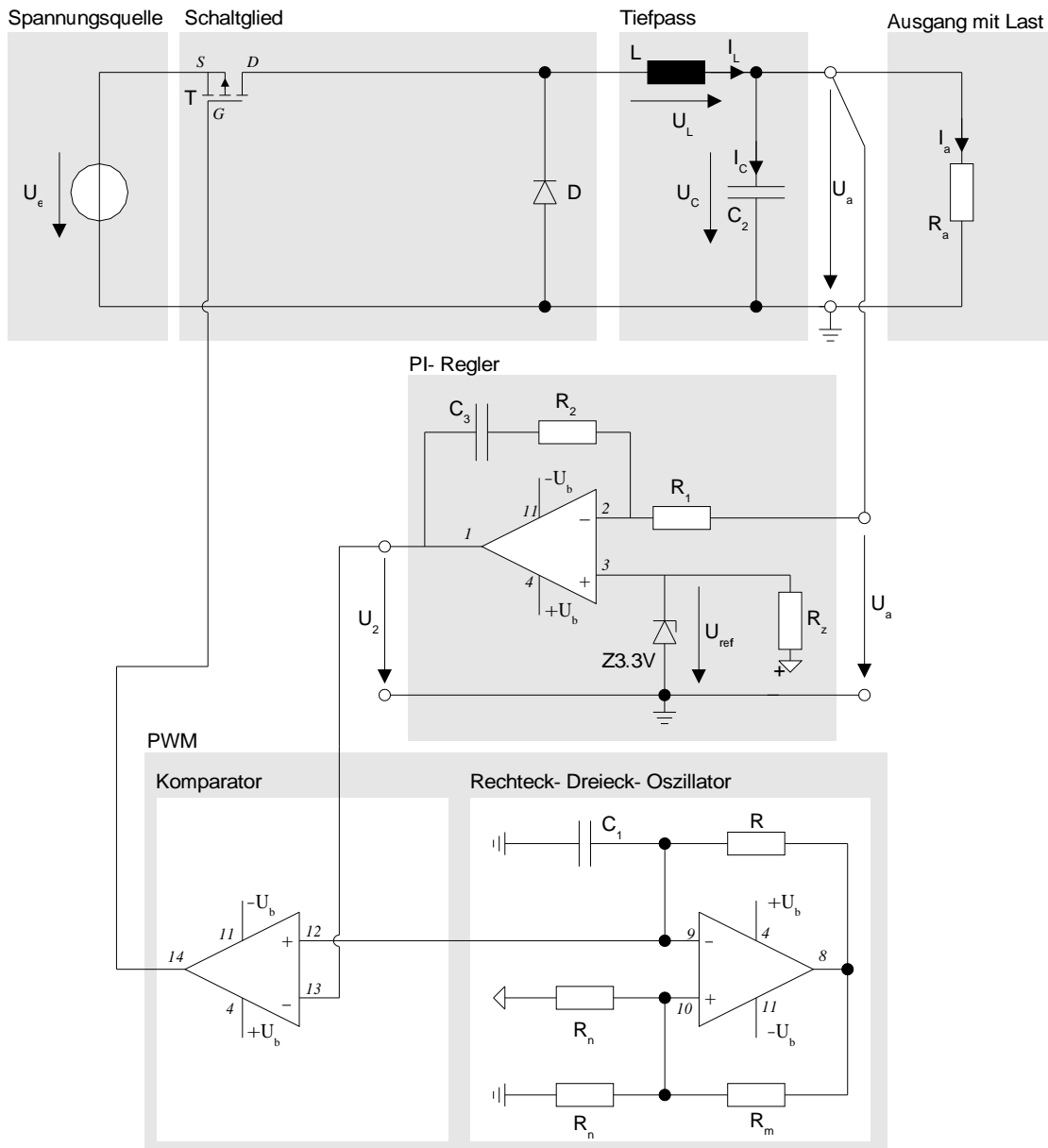


Abbildung 13: Detailschema des Abwärtswandlers mit Regler

### 4.3.5 Bauteile für den Abwärtswandler

Bauteile des Abwärtswandlers: siehe 3.3.5

Bauteile des PWM Signal Erzeugers: siehe 3.3.3

Bauteile des PI-Reglers siehe 4.3.3

### 4.4 Fehlerabschätzung

Zur Erzeugung eines Sollwerts am Eingang des PI-Reglers wird eine Zenerdiode ( $Z$ ) und parallel dazu ein Widerstand ( $R_z$ ) geschaltet.  $Z$  und  $R_z$  sollten eine konstante Referenzspannung erzeugen, was jedoch technisch gesehen wegen der Eigenschaft der Zenerdiode nicht realisierbar ist. In der Praxis wird die Zenerdiode durch ein präziser arbeitendes Bauteil ersetzt.

Da der Operationsverstärker im PI-Regler die Differenz zwischen Soll- und Ist-Wert verstärkt, werden hier Abweichungen zu messen sein.

Ebenfalls wurden willkürlich Bauteile aus den Elektrotechnik Ressourcen der ZHW verwendet. Da diese Bauteile nicht aufeinander abgestimmt wurden, wird sich dies in einer Verringerung des Wirkungsgrads um etwa 20%-30% niederschlagen.

In der Schaltung selber wird ein Leistungsabfall, verursacht durch die Spule, die Kondensatoren und die Widerstände, unvermeidlich sein.

### 4.5 Testaufbau

Abbildung 14 zeigt den schematischen Testaufbau mit dem die Messungen durchgeführt werden.

Am Speisegerät werden die gewünschten Eingangsspannungen eingestellt und am Messgerät  $V_1$  abgelesen.

Mit den Messgeräten  $V_2$  und  $A_2$  werden

Ausgangsspannung und -strom gemessen. Die Ausgangsspannung  $U_a$  ist die relevante Messgröße, weshalb (aus Sicht des Abwärtswandlers) mit einer Stromfehlerschaltung gemessen wird. Der Ausgangsstrom  $I_a$  wird bezüglich des spezifizierten Höchstwertes von  $300mA$  kontrolliert.

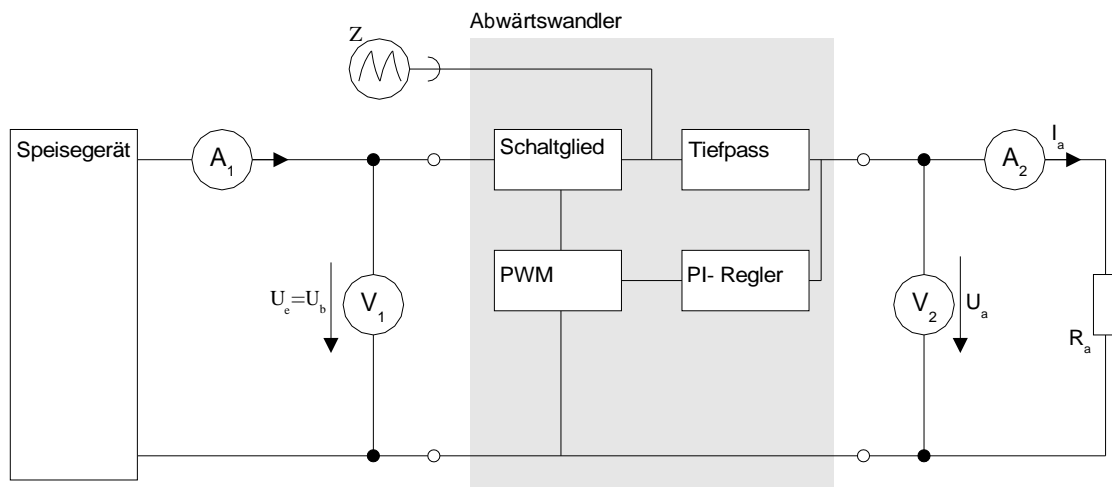


Abbildung 14: Testaufbau

#### 4.5.1 Angaben für Messgeräte

Symbol	Gerät	Nummer	Messbereich	Toleranz
$V_1$	Voltmeter	ABB Metrawatt M2012, ZHW-Nr. EH.103.53 (digital)	10V	$\pm(0.25\% + 1D.)$
$V_2$	Voltmeter	ABB Metrawatt M2012, ZHW-Nr. EH.103.44 (digital)	10V	$\pm(0.25\% + 1D.)$
$A_1$	Amperemeter	ABB Metrawatt M2012, ZHW-Nr. EH.103.58 (digital)	1A	$\pm(1.25\% + 1D.)$
$A_2$	Amperemeter	ZHW-Nr. EH.102.15 (analog, Kl. 2)	1A 200mA	$\pm 20mA$ $\pm 4mA$

#### 4.6 Messreihen

Für verschiedene Eingangsspannungen  $U_e$  werden der Eingangsstrom  $I_e$ , die Ausgangsspannung  $U_a$  und der Ausgangsstrom  $I_a$  erfasst. Aus diesen Grössen werden die aufgenommene und die abgegebene Leistung

berechnet. Der Wirkungsgrad der Schaltung wird dann als Verhältnis der Leistungen angegeben.

Gemessen wird mit den Eingangsspannungen 4V, 7V und 10V.

#### 4.7 Fehlerkorrekturen

Für die Bestimmung von  $R_1$  und  $C_3$  wurde von der Formel

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC_2}} \geq 10 \cdot \frac{1}{2\pi R_1 C_3}$$

ausgegangen. Als Anfangswert wurde für  $C_3$  ein Wert von 1nF und für  $R_1$  1kΩ gewählt.

Damit der PI-Regler aber im Bereich von 4V bis 10V ( $U_e$ ) stabil arbeitet und ein Schwingen verhindert werden konnte, wurde  $C_1$  schrittweise verkleinert (Faktor 10) bez.  $R_1$  wurde um denselben Faktor vergrössert.

Die Werte 1μF für  $C_3$  und 100Ω für  $R_1$  haben sich in der Praxis bewährt.

#### 4.8 Berechnungen

Der Wirkungsgrad wird wie folgt berechnet:

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{auf}} = \frac{P_a}{P_e} = \frac{U_a \cdot I_a}{U_e \cdot I_e}$$

## 4.9 Messresultate

### 4.9.1 Wirkungsgrad

$R_a$	$U_e$	$I_e$	$P_e$	$U_a$	$I_a$	$P_a$	$\eta$
10.0	4.0	240.0	0.96	2.58	220.0	0.568	0.59
22.0	4.0	125.0	0.5	2.58	110.0	0.284	0.57
39.0	4.0	78.6	0.314	2.58	60.0	0.155	0.49
82.0	4.0	49.0	0.196	2.58	26.5	0.068	0.35
10.0	7.0	241.0	1.687	2.96	255.0	0.755	0.45
22.0	7.0	134.0	0.938	2.96	120.0	0.355	0.38
39.0	7.0	95.0	0.665	2.96	70.0	0.207	0.31
82.0	7.0	71.0	0.497	2.96	50.0	0.148	0.30
10.0	10.0	220.0	2.20	3.17	265.0	0.840	0.38
22.0	10.0	147.0	1.47	3.17	135.0	0.428	0.29
39.0	10.0	118.0	1.18	3.17	75.0	0.238	0.20
82.0	10.0	98.0	0.98	3.17	38.0	0.120	0.12

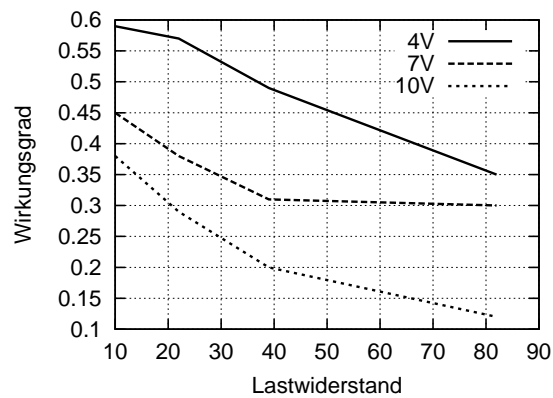
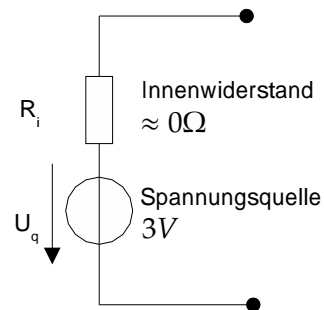
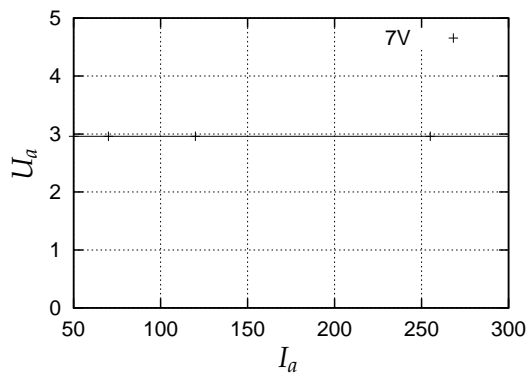


Abbildung 15: Wirkungsgrad der Schaltung in Abhängigkeit des Lastwiderstands

### 4.10 Linearisierung



#### 4.11 Optimierungsmassnahmen

Damit die Ausgangsspannung  $U_a$  unabhängig von der Eingangsspannung  $U_e$  würde, müsste im PI-Regler die Zenerdiode durch ein genauer arbeitendes Bauteil ersetzt werden.

Ebenfalls müssten alle verwendeten Bauteile in ihrem optimalen Zustand arbeiten und aufeinander abgestimmt werden. Der Wirkungsgrad der Schaltung liesse sich so erhöhen.

## A Glossar

<b>Begriff</b>	<b>Erklärung</b>
<i>Tiefpass</i>	Ein Tiefpass besteht aus einer Induktivität und einem Kondensator. Seine Funktion ist das Glätten von Spannungsschwankungen.
<i>Pulse Width Modulator (PWM)</i>	Ein PWM ist ein Gerät, das Impulse mit beliebigen Ein- / Ausschaltverhältnissen generieren kann. PWM's werden zum Beispiel in Licht-Dimmern oder zur Drehzahl Regelung in DC Motoren eingesetzt.

## B Literatur

- [1] Kories, Schmidt-Walter, *Taschenbuch der Elektrotechnik*, Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt am Main, D, 2000.
- [2] Europa Lehrmittel, *Fachkunde Industrieelektronik und Informationstechnik*, Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co, D, 1999.
- [3] Internet Site gut-hoeren.ch, <http://www.gut-hoeren.ch/de/guteshoeren/wiehoerenwir>, Verband Akustika, 2002.

## C Kommentar

### C.1 Lerneffekt

Das Projekt war insgesamt vor allem in praktischer Hinsicht sehr lehrreich.

Beim Erstellen der Dokumentation haben wir unsere Fähigkeiten im Umgang mit folgenden Programmen ausgebaut:

- L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X- Drucksatz
- gnuplot - Erstellung von Plots, Automatische Kurvenangleichung
- Bash Programmierung - Automatisierung der Plots
- make - Automatisierung der gesamten Dokumentationserstellung
- CVS - Versionskontrolle und Zusammenführen der Dokumentation