

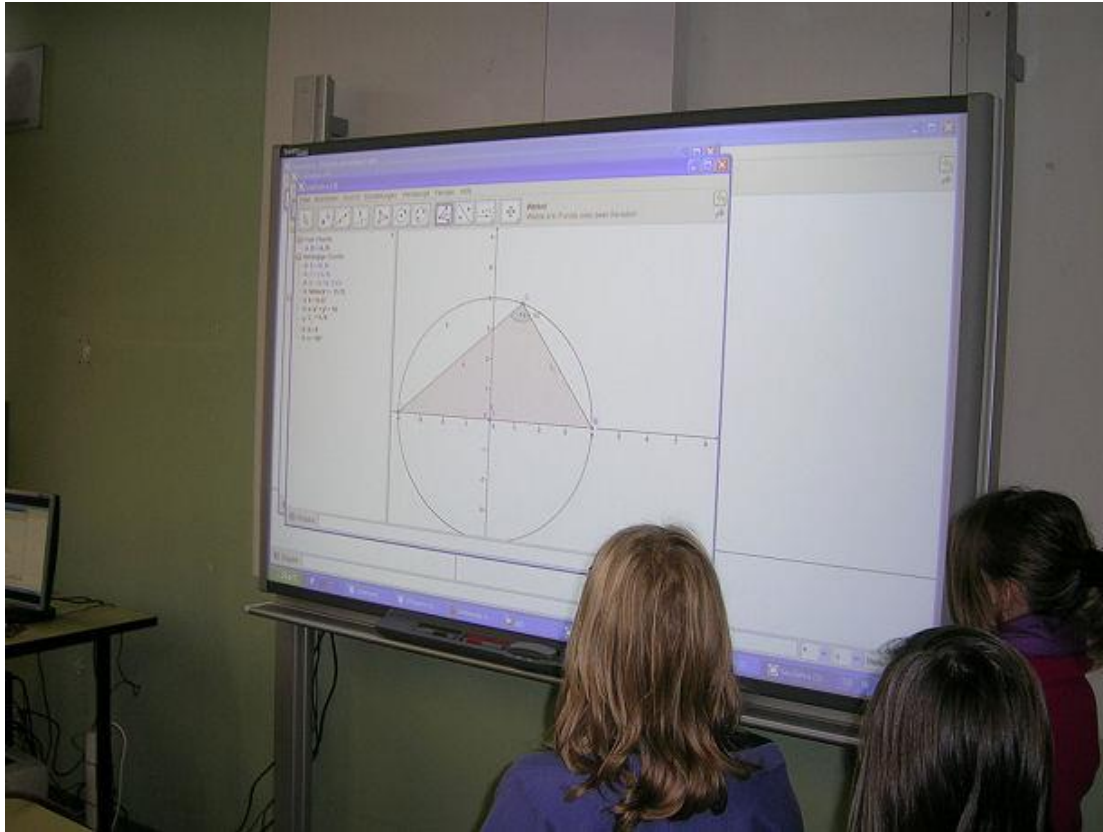
# **Spannungsregler/ Schaltregler**

(v. A. Reichert)

<b>1. Einleitung</b> .....	<b>3</b>
<b>2. Spannungsregler</b> .....	<b>5</b>
2.1 Grundlagen .....	5
2.2 Spannungsregler aus diskreten Bauteilen .....	8
2.3 Spannungsregler mit Operationsverstärker .....	11
2.4 Kompletregler .....	14
2.4.1 Regler der Reihe 78xx .....	15
2.4.2 Einstellbarer Regler LM 317 .....	17
2.4.3 Low-Drop-Regler LD 1117V30 .....	19
2.5 Verschiedenes .....	23
2.5.1 Grundlagen .....	23
2.5.2 Schaltungen .....	25
<b>3. Schaltregler</b> .....	<b>28</b>
3.1 Grundlagen .....	28
3.2 Konkrete Regler .....	34
3.2.1 Schaltregler 7809 .....	34
3.2.2 LED-Konverter .....	39
3.2.3 LED-Taschenlampe .....	45
<b>4. Literaturverzeichnis</b> .....	<b>47</b>

## 1. Einleitung

Elektronische Geräte haben in den letzten Jahrzehnten fast alle Lebensbereiche erobert. MP3-Player, Handy, Digitalfernseher, Computer, Digitalkamera, elektronische Tafel sind nur einige Beispiele für die Vielzahl der elektronischen Medien, die heute viele wie selbstverständlich nutzen. Auch der Automechaniker wurde zum Mechatroniker. Inzwischen läuft die Elektronik der Mechanik den Rang ab. Leider schlägt sich diese Entwicklung noch nicht im Physikunterricht nieder.



**Abb.1: elektronische Tafel**

Elektronische Geräte benötigen fast immer Gleichspannung, meist sogar in geregelter Form, um z.B. Brummstörungen durch die Netzfrequenz zu unterdrücken. Aus der Steckdose kommt aber nach wie vor Wechselstrom. Das wird wohl auch noch längere Zeit so bleiben, da diese Technik trotz einiger Nachteile entscheidende Vorteile aufweist. Interessant ist in diesem Zusammenhang die Tatsache, dass Edison zu Beginn der Elektrifizierung auf Gleichspannung und Kleinkraftwerke in jeder Straße oder sogar jedem Haus setzte. Westinghouse und Tesla favorisierten dagegen die Wechselstromtechnik und zentrale Großkraftwerke. Sie gewannen damit den Stromkrieg vor rund 100 Jahren. Heute flammt diese Diskussion wieder auf. Sollten LED's in der Beleuchtungstechnik ihren Siegeszug antreten, so wird Gleichstrom immer mehr an Bedeutung gewinnen. In diesem Zusammenhang sei nur an die sich immer weiter verbreitende Photovoltaik zur Stromerzeugung erinnert. Gerade LED's benöti-

gen aber sehr konstante Gleichspannungen, da sie auf Spannungsschwankungen extrem empfindlich reagieren. Weil die herkömmlichen Spannungsregler mit schlechten Wirkungsgraden arbeiten, sind für die LED's Schaltregler entwickelt worden, die diesen Mangel beseitigen. Ansonsten würde die wesentlich bessere Lichtausbeute der LED's durch die schlechte Energienutzung der Treiber zunichte gemacht. Netzgeräte auf der Basis von Schaltreglern sind immer mehr auf dem Vormarsch, z.B. in Ladegeräten für Handys, Digitalkameras usw. In diesem Artikel soll diese Entwicklung nachgezeichnet werden. Zunächst wird mit Hilfe einiger kleiner selbst entwickelter Schaltungen die Funktionsweise von Spannungsreglern und Schaltreglern erklärt. Danach werden einige im Elektronikhandel erhältliche fertig aufgebaute Regler auf ihre Eigenschaften hin untersucht. Ich wünsche dem Leser viel Spaß mit der Lektüre und vor allem beim Basteln.

Stolberg, im März 2011

## 2. Spannungsregler

### 2.1 Grundlagen

Spannungsregler liefern an ihrem Ausgang eine konstante, geglättete Gleichspannung mit einem bestimmten Spannungswert, auch wenn die Eingangsspannung schwankt oder eine hohe Welligkeit aufweist. Etwa die Hälfte der Regler ist nur für eine Ausgangsspannung ausgelegt, bei anderen lässt sich die Ausgangsspannung über ein Potentiometer in einem weiten Bereich den Bedürfnissen anpassen. Die ersteren sind entsprechend preiswerter. Liegt der Spannungsregler bei gemeinsamer Minusleitung in der positiven Leitung zwischen Eingang und Ausgang, so benötigt man einen Positivregler. Einen Negativregler setzt man ein, wenn der Regler die Minusleitung zwischen Eingang und Ausgang steuern soll, wobei die Plusleitung für beide identisch ist. Bei herkömmlichen Spannungsreglern muss die Eingangsspannung mindestens 2 - 3V über der Ausgangsspannung liegen. Die Differenzspannung erzeugt im Regler eine Verlustleistung, die gegebenenfalls über einen Kühlkörper abgeführt werden muss. Bei Low-Drop-Regler reicht eine Differenzspannung von ca. 1V zwischen Eingang und Ausgang. Bei ihnen sind die Verlustleistung und die Wärmeentwicklung geringer, was einen Kühlkörper bei richtiger Dimensionierung der Eingangsspannung überflüssig macht. Sie werden daher meist in Mikroprozessorschaltungen eingesetzt, sind aber etwas teurer als herkömmliche Regler. Welcher Typ für welche Anwendung geeignet ist, muss man im Einzelfall entscheiden. Den grundsätzlichen Aufbau eines Positivreglers zeigt Abb.1.

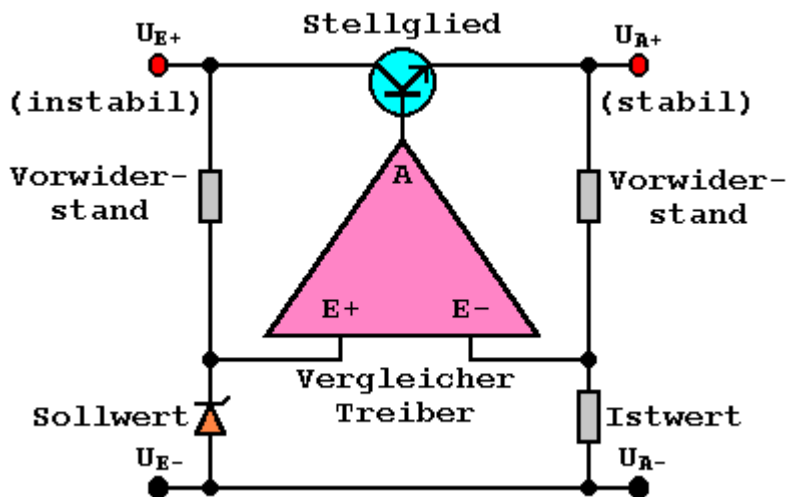
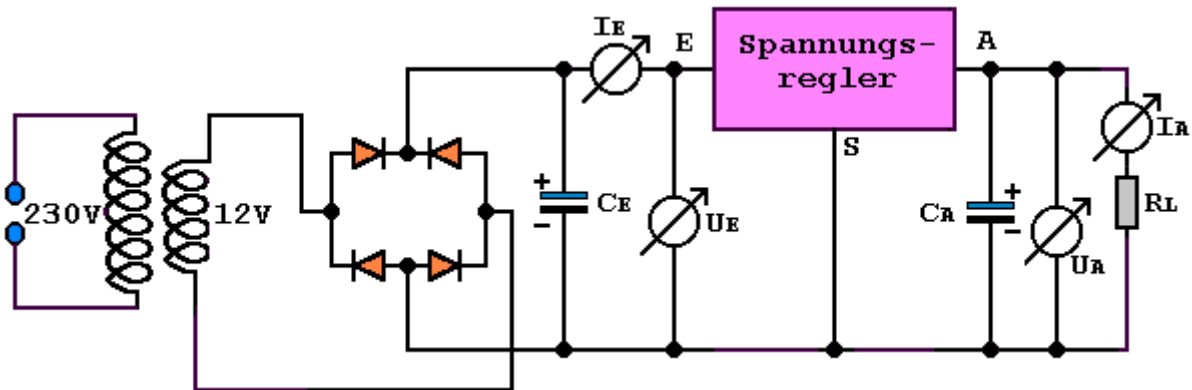


Abb.1: Aufbau eines Reglers

Aus der unstablen Eingangsgleichspannung wird ein Referenzsollwert gewonnen, etwa mit einer Zenerdiode. Das Stellglied erzeugt die stabile Ausgangsspannung. Ihr Istwert wird an einem Lastwiderstand abgegriffen, in einem Komparator mit der Referenz verglichen und über das Stellglied notfalls nachge-

regelt. Eingebaut wird ein solcher Regler zwischen das Netzteil und den Lastwiderstand  $R_L$  nach Abb.2. Er ist als kompaktes Bauteil im Handel erhältlich und erfordert in der Regel keine zusätzlichen externen Bauteile, allenfalls einen kleinen Kondensator am Ausgang.



**Abb.2: Einbau des Reglers in ein Netzgerät**

Die Netzspannung von 230V wird herunter transformiert auf z.B. 12V und mit einer Graetzschaltung gleichgerichtet. Die resultierende pulsierende Gleichspannung glättet man mit einem Kondensator  $C_E$  und legt sie an den Eingang des Reglers. Am Ausgang liefert er die benötigte geregelte Gleichspannung.

Technisch lassen sich die Vorgänge in einem Spannungsregler mit diskreten Bauteilen realisieren, bessere Ergebnisse erzielt man durch den Einsatz eines Operationsverstärkers. Beide Varianten werden in den folgenden Kapiteln vorgestellt.

Für den Wirkungsgrad  $\eta$  eines Reglers gilt gemäß Definition:

$$\eta = P_a \cdot 100\% / P_e$$

$$= (U_a \cdot I_a) \cdot 100\% / (U_e \cdot I_e)$$

mit  $P_a$  als Ausgangsleistung,  $P_e$  als Eingangsleistung,  $U_a$  als Ausgangsspannung,  $I_a$  als Ausgangsstrom,  $U_e$  als Eingangsspannung und  $I_e$  als Eingangsstrom. Da moderne Regler mit einem Regelstrom im mA-Bereich auskommen, ist im normalen Betrieb

$$I_a \approx I_e,$$

so dass folgt

$$\eta = U_a \cdot 100\% / U_e.$$

Im Idealfall übersteigt die Eingangsspannung  $U_e$  die Ausgangsspannung  $U_a$  nur um die vom Regler benötigte Steuerspannung  $U_R$ . Damit erhält man für den maximalen Wirkungsgrad

$$\eta = U_a \cdot 100\% / (U_a + U_R).$$

Der Regler LM 317K, der in Kapitel 2.4.2 vorgestellt wird, benötigt eine Steuerspannung  $U_R = 1,8 \text{ V}$ . Bei einer Ausgangsspannung  $U_a = 3\text{V}$  hat er somit einen maximalen Wirkungsgrad

$$\begin{aligned}\eta_1 &= 3\text{V} \cdot 100\% / (3\text{V} + 1,8\text{V}) \\ &= 62,5\%,\end{aligned}$$

bei  $U_a = 9\text{V}$  dagegen

$$\begin{aligned}\eta_2 &= 9\text{V} \cdot 100\% / (9\text{V} + 1,8\text{V}) \\ &= 83,3\%.\end{aligned}$$

Er nimmt mit der Ausgangsspannung zu, da die Steuerspannung für alle Ausgangsspannungen gleich bleibt. Ersetzt man den Regler durch einen Low-Drop-Regler, etwa den LD 1117 (vgl. Kapitel 2.4.3), der als Steuerspannung nur  $U_R = 1,06 \text{ V}$  benötigt, so steigen die Wirkungsgrade auf

$$\begin{aligned}\eta_1 &= 3\text{V} \cdot 100\% / (3\text{V} + 1,06\text{V}) \\ &= 73,9\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\eta_2 &= 9\text{V} \cdot 100\% / (9\text{V} + 1,06\text{V}) \\ &= 89,5\%.\end{aligned}$$

Low-Drop-Regler besitzen also dann Vorteile, wenn die Eingangsspannung nur 1 - 2 V über der Ausgangsspannung liegt und die Ausgangsspannung nicht sehr hoch ist, etwa in Laptops. Übersteigt die Eingangsspannung die Summe aus der Ausgangsspannung und der Steuerspannung, so bieten sie keine Vorteile mehr, da die überschüssige Leistung so oder so vom Regler abgeführt werden muss. Der Wirkungsgrad fällt dann grundsätzlich stark ab. Der Eingangsstrom fließt in diesen so genannten Linearreglern direkt zum Ausgang und verursacht im Regler einen Wärmeverlust. Er wird vom Regler so gesteuert, dass die Ausgangsspannung konstant bleibt, auch wenn die Last sich ändert. In diesem Punkt haben Schaltregler einen entscheidenden Vorteil. In ihnen wird wie beim Transformator Energie aus einem Primärkreis in einen Sekundärkreis übertragen. Je nach Spannung im Primär- bzw. Sekundärkreis kann daher der Eingangsstrom kleiner sein als der Ausgangsstrom. Ihr Wirkungsgrad kann theoretisch bis zu 100% betragen. In der Praxis liegt er etwas darunter, ist aber deutlich höher als bei Spannungsreglern, weshalb sie immer stärkere Verbreitung finden.

## 2.2 Spannungsregler aus diskreten Bauteilen

Die Abb.1 zeigt die konkrete Schaltung eines Positivreglers aus diskreten Bausteinen.

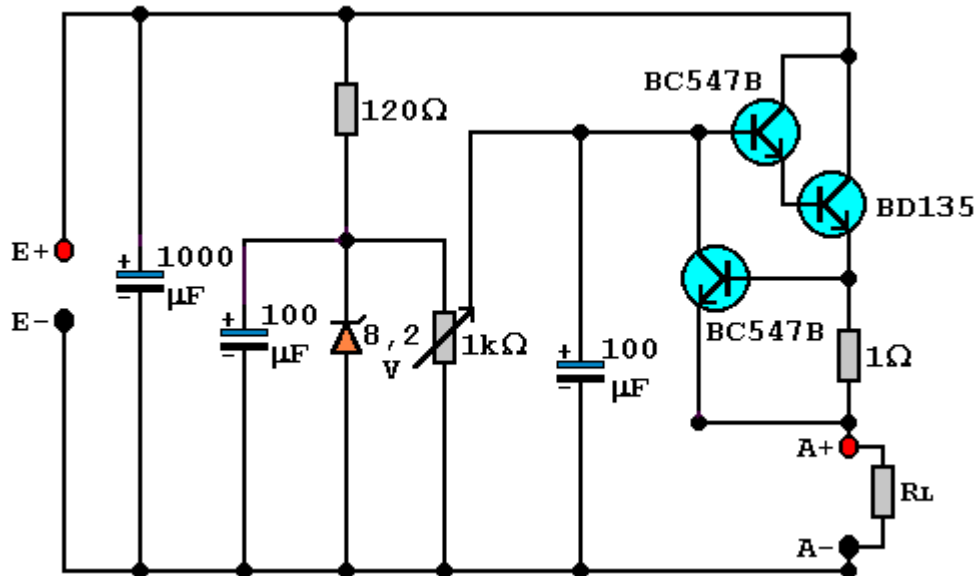


Abb.1: Regler aus diskreten Bauteilen

Aus der Eingangsspannung gewinnt man mit einer Zenerdiode den Referenzwert, der mit Hilfe des Kondensators geglättet wird. Ein Teil dieser Spannung wird über ein Poti der Basis eines Darlingtontransistors, bestehend aus einem Kleintransistor BC 547B und einem Leistungstransistor BD 135, zugeführt. Er wird als Emitterfolger betrieben. Je höher man die Basisspannung über das Poti einstellt, umso größer ist die abgreifbare Ausgangsspannung A. Der zweite Transistor BC 547B schützt die Schaltung vor einem zu hohen Strom. Übersteigt er einen Wert von 0,6 - 0,7A, so wird der zweite Transistor leitend und verringert die Basis-Emitterspannung der Darlingtonschaltung so weit, dass er nicht mehr voll durchschalten kann. Die Ausgangsspannung regelt sich von selbst. Es ist kein aktiver Komparator erforderlich. Steigt der Ausgangsstrom am Lastwiderstand, so steigt das Potential des Emitters des Darlingtontransistors an, die Basis-Emitter-Spannung sinkt, da das Basispotential über den Referenzwert konstant gehalten wird. Der Transistor regelt den Strom herunter. Das Gegenteil passiert, wenn der Laststrom sinkt. Die Schaltung verhält sich wie eine Konstantstromquelle, wobei sich der Strom über das Poti regeln lässt. Um das Verhalten der Schaltung zu testen, verlötet man sie auf einer Platine. Abb.2 zeigt die Verschaltung. Die fertige Platine klebt man mit etwas Patex und zwei Holzleisten, an die man die Platine schraubt, auf den Boden einer Ferrero-Rocher- oder Mon-Cherry-Dose. Die Buchsen für die Ein- und Ausgänge und das Potentiometer befestigt man am Deckel der Dose und verlötet sie mit etwas Schalltlitze mit den entsprechen-



den Anschlüssen auf der Platine. Man benötigt zwei rote für die Pluspole des Einganges  $E_+$  und des Ausganges  $A_+$  und eine schwarze für den gemeinsamen Minuspol  $E_-/A_-$ . Mit der kompletten Schaltung führt man folgenden Versuch durch.

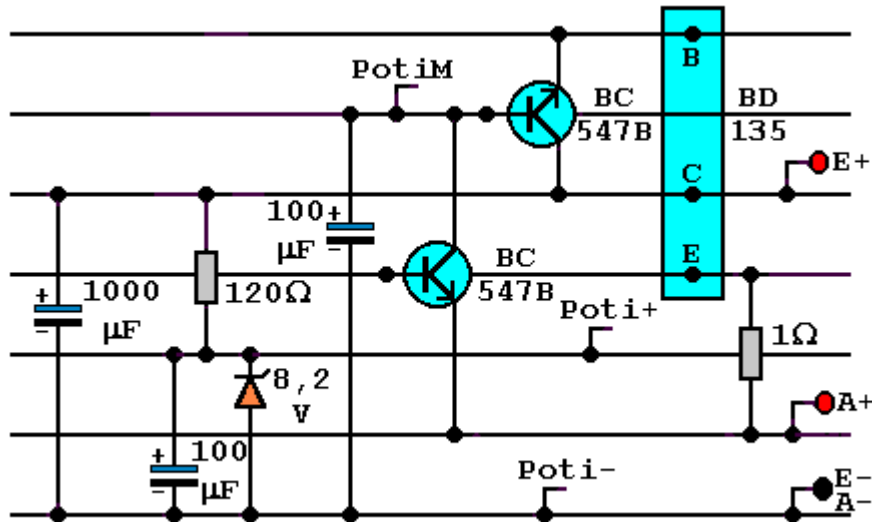


Abb.2: Verschaltung auf einer Lochrasterplatine

**Versuch:**

**Aufbau:**

Man schließt an den Eingang ein handelsübliches Netzteil mit  $U = 12V$  und  $I = 500mA$  an. An den Ausgang legt man ein Voltmeter, ein Amperemeter und ein Trimpotentiometer  $R_L$  mit einer Leistung  $P = 10 W$ . Amperemeter und Potentiometer werden in Reihe geschaltet, das Voltmeter parallel zum Ausgang. Als Ausgangsspannung wählt man am Spannungsregler den maximalen Wert  $U_a = 7V$ . Mit zwei weiteren Volt- bzw. Amperemetern überwacht man den Eingangstrom  $I_e$  und die Eingangsspannung  $U_e$  am Regler.

**Durchführung:**

Man stellt mit dem Potentiometer  $R_L$  verschiedene Ausgangsströme  $I_a$  ein und zwar in Schritten von  $0,1 A$  und liest die zugehörige Ein- und Ausgangswerte ab. Die Werte trägt man in eine Tabelle ein. Man ersetzt die Voltmeter durch jeweils einen Kanal eines Oszillographen oder Picoscopes. Als Bezugspunkt dient der gemeinsame Minuspol.

**Beobachtung:**

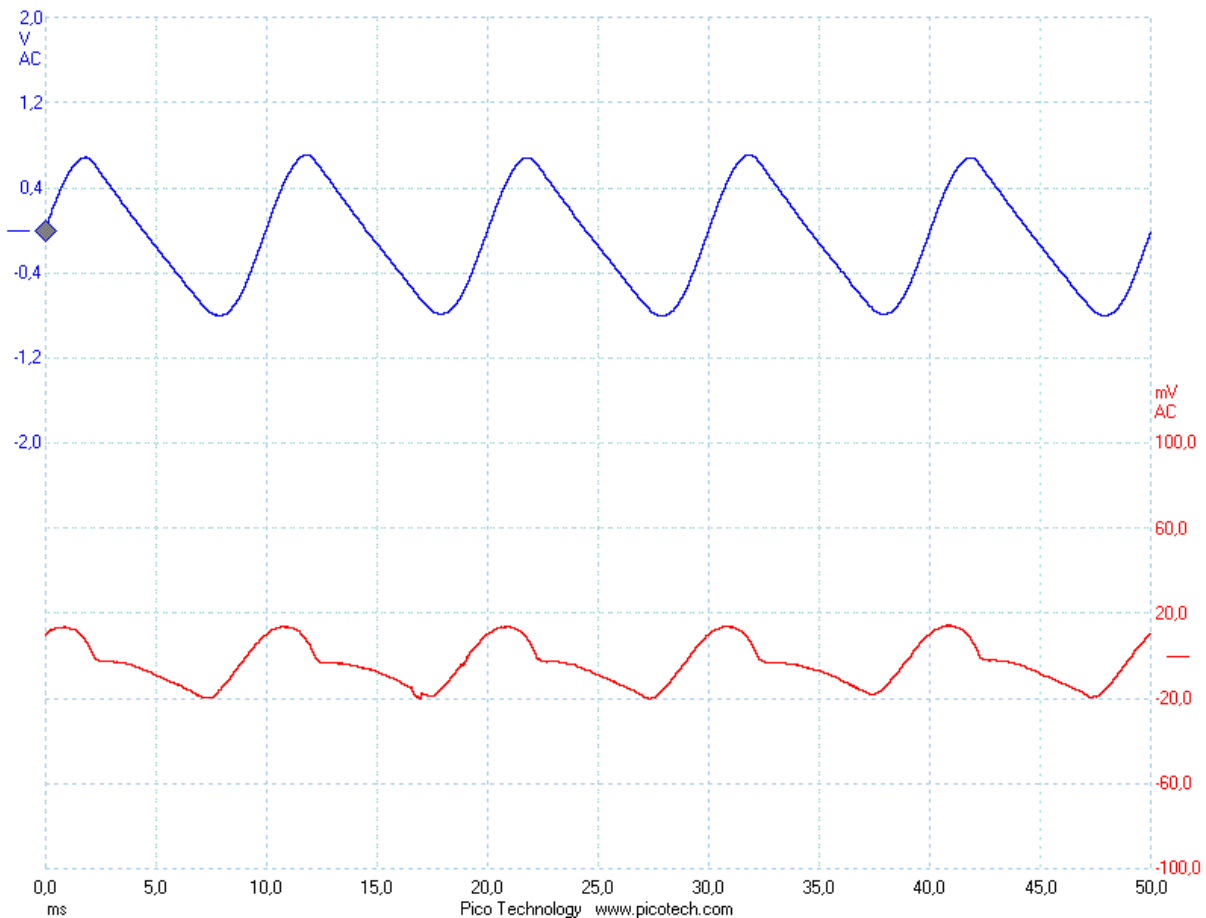
Man erhält folgende Messtabelle:

$I_e [A]$	$U_e [V]$	$I_a [A]$	$U_a [V]$	$P_e [W]$	$P_a [W]$	$\eta [%]$
0,157	15,5	0,1	7,02	2,43	0,70	28,8
0,246	14,4	0,2	6,93	3,54	1,39	39,3
0,336	13,2	0,3	6,74	4,43	2,02	45,6
0,427	12,4	0,4	6,39	5,29	2,56	48,4
0,518	11,5	0,5	6,23	5,96	3,12	52,3

Der Wirkungsgrad in der letzten Spalte wurde wie folgt berechnet:

$$\eta = P_a \cdot 100\% / P_e.$$

Das Picoscope zeichnet die Kurven in Abb.3 auf:



**Abb.3: Welligkeit der Eingangs- und Ausgangsspannung**

Aus der oberen Kurve liest man bei einem Ausgangsstrom von  $I_a = 0,3 \text{ A}$  eine Eingangswelligkeit  $\Delta U_e = 1,4 \text{ V}$  und aus der unteren Kurve eine Ausgangswelligkeit  $\Delta U_a = 35 \text{ mV}$  ab. Sie steigt am Eingang auf  $\Delta U_e = 2,1 \text{ V}$  und am Ausgang auf  $\Delta U_a = 55 \text{ mV}$ , wenn man den Ausgangsstrom auf  $I_a = 0,5 \text{ A}$  erhöht.

**Folgerung:**

Die Ausgangsspannung bleibt nicht sonderlich gut konstant. Immerhin sinkt sie bis zur Belastungsgrenze des Netzteiles von  $0,5 \text{ A}$  um

$$\begin{aligned} Pr_a &= (7,02\text{V} - 6,23\text{V}) \cdot 100\% / 7,02\text{V} \\ &= 11,3\%, \end{aligned}$$

während die Eingangsspannung um

$$\begin{aligned} Pr_e &= (15,5\text{V} - 11,5\text{V}) \cdot 100\% / 15,5\text{V} \\ &= 25,8\% \end{aligned}$$

abgenommen hat. Die Welligkeit  $\Delta U$  der Eingangsspannung wird durch den Regler um den Faktor

$$z = 1,4V/0,035V \\ = 40$$

erniedrigt und macht sich kaum noch bemerkbar. Der Wirkungsgrad ist nicht besonders hoch. Am Leistungstransistor treten Wärmeverluste auf, die sich in einer merklichen Erwärmung äußern und daher im Dauerbetrieb einen Kühlkörper nötig machen.

### 2.3 Spannungsregler mit Operationsverstärker

Deutlich bessere Ergebnisse erzielt man, wenn man im Regler als Komparator einen Operationsverstärker einsetzt. Einen möglichen Schaltplan zeigt Abb. 1.

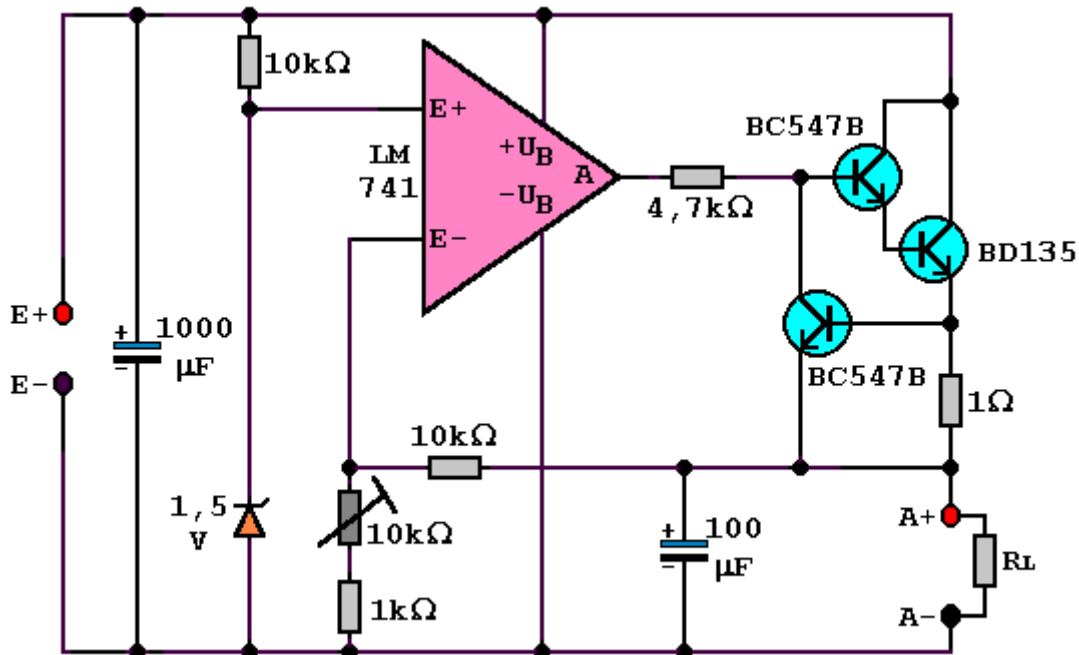


Abb.1: Spannungsregler mit Operationsverstärker

Es wird das gleiche Stellglied verwendet wie im zuvor behandelten Spannungsregler aus diskreten Bauteilen. Die Referenzspannung wird mit einer Zenerdiode kleinerer Spannung gewonnen, da die für den Darlingtontransistor benötigte Basisspannung durch den OP erzeugt wird. Der Regler liefert eine Ausgangsspannung zwischen 3,5 V und 14,5 V, wenn er an einem Netzgerät mit den Kenndaten 12V/500mA betrieben wird. Allerdings ist die Spannung beim maximalen Wert nicht sehr konstant, wenn man die Belastung erhöht. Da der OP versucht, seine beiden Eingänge E- und E+ auf gleichem Potential zu erhalten, erhält man theoretisch bei voll zugedrehtem Potentiometer eine Ausgangsspannung von

$$U_a = 21\text{k}\Omega \cdot 1,5\text{V} / 11\text{k}\Omega$$

$$= 2,9\text{V}$$

und bei voll aufgedrehtem Poti

$$U_a = 11\text{k}\Omega \cdot 1,5\text{V} / 1\text{k}\Omega$$

$$= 16,5\text{V}.$$

Diese Spannungen werden in der Praxis aber nicht ganz erreicht, da der eingesetzte OP nur im Ausgangsspannungsbereich von 4 - 15 V zuverlässig arbeitet. Die tatsächlichen Werte liegen mit 3,5 V bzw. 14,5 V etwas höher bzw. niedriger als die theoretisch möglichen. Man könnte die Widerstände entsprechend anpassen, aber ich habe mich für gängige Werte entschieden. Abb.2 zeigt die Verschaltung auf einer Lochrasterplatine. Die fertige Platine klebt man mit etwas Patex und zwei Holzleisten, an die man die Platine schraubt, auf den Boden einer Ferrero-Rocher- oder Mon-Cherry-Dose. Die Buchsen für die Ein- und Ausgänge und das Potentiometer befestigt man am Deckel der Dose und verlötet sie mit etwas Schaltlitze mit den entsprechenden Anschlüssen auf der Platine. Man benötigt zwei rote für die Pluspole des Einganges E<sub>+</sub> und des Ausganges A<sub>+</sub> und eine schwarze für den gemeinsamen Minuspol E<sub>-</sub>/A<sub>-</sub>.

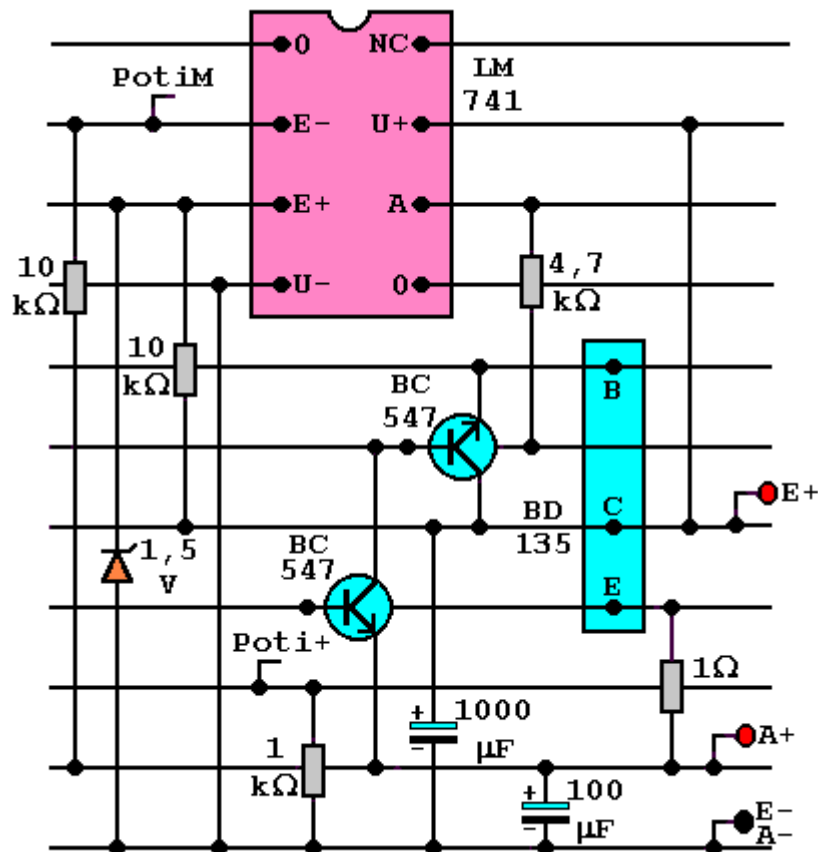


Abb.2: Verschaltung auf einer Lochrasterplatine

Um das Verhalten der Schaltung zu testen, wiederholt man mit der Schaltung den Versuch aus Kapitel 2.2.

**Versuch:**

**Aufbau:**

s. Kapitel 2.2

**Durchführung:**

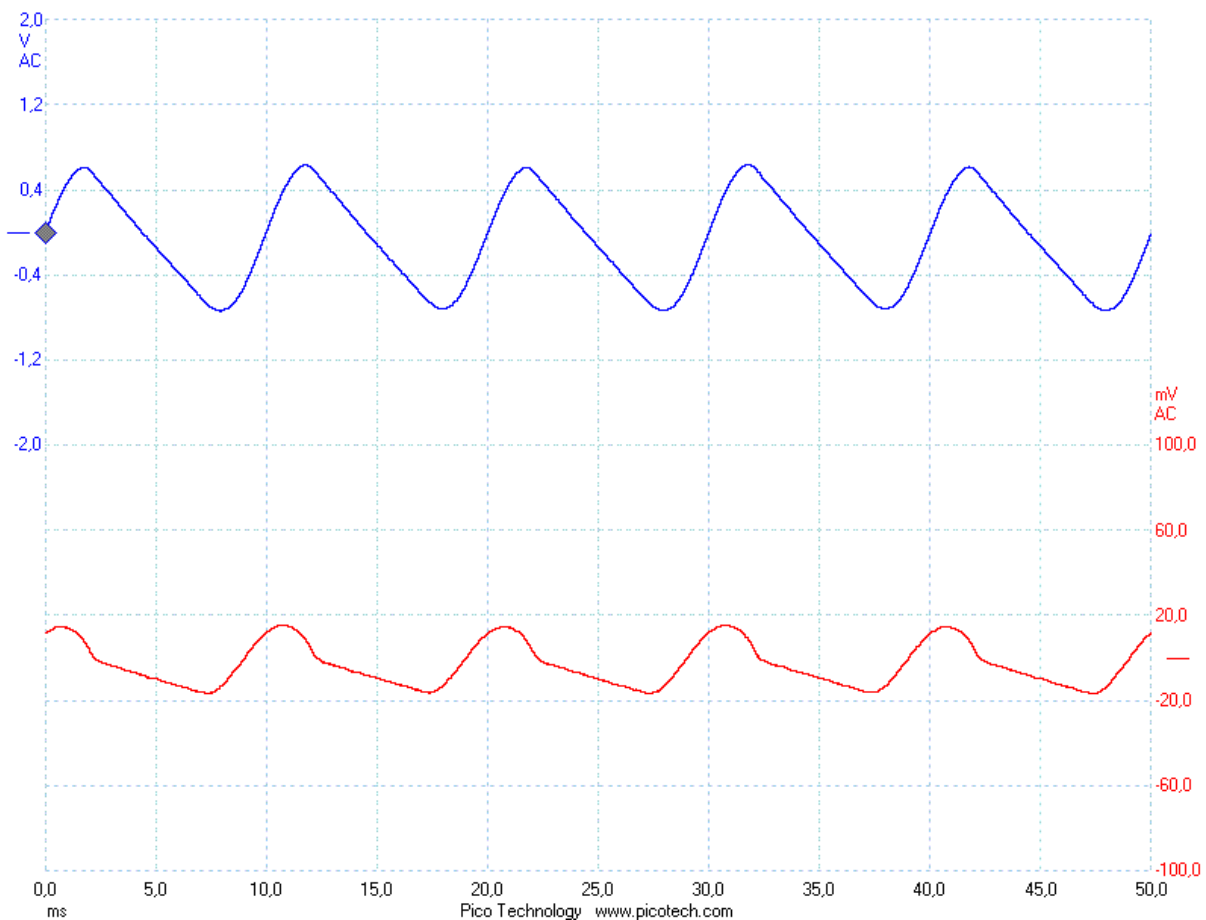
s. Kapitel 2.2

**Ergebnis:**

Man erhält folgende Messtabelle:

$I_e$ [A]	$U_e$ [V]	$I_a$ [A]	$U_a$ [V]	$P_e$ [W]	$P_a$ [W]	$\eta$ [%]
0,105	16,3	0,1	6,99	1,71	0,70	40,9
0,205	15,0	0,2	6,98	3,08	1,40	45,5
0,304	14,0	0,3	6,97	4,26	2,09	49,1
0,404	12,7	0,4	6,96	5,13	2,78	54,2
0,505	11,9	0,5	6,93	6,01	3,47	57,7

Das Picoscope liefert die Kurven in Abb.3.



**Abb.3: Welligkeit der Eingangs- und Ausgangsspannung**

Aus der oberen Kurve liest man bei einem Ausgangsstrom von  $I_a = 0,3$  A eine Eingangswelligkeit  $\Delta U_e = 1,4$  V und aus der unteren Kurve eine Ausgangswelligkeit von  $\Delta U_a = 30$  mV ab. Sie steigt am

Eingang auf  $\Delta U_e = 2,1 \text{ V}$  und am Ausgang auf  $\Delta U_a = 45 \text{ mV}$ , wenn man den Ausgangsstrom auf  $I_a = 0,5 \text{ A}$  erhöht.

**Folgerung:**

Die Ausgangsspannung bleibt sehr gut konstant. Immerhin sinkt sie bis zur Belastungsgrenze des Netzteiles von  $0,5 \text{ A}$  nur um

$$\begin{aligned} Pr_a &= (6,99\text{V} - 6,93\text{V}) * 100\% / 6,99\text{V} \\ &= 0,86\%, \end{aligned}$$

während die Eingangsspannung um

$$\begin{aligned} Pr_e &= (16,3\text{V} - 11,9\text{V}) * 100\% / 16,3\text{V} \\ &= 27\% \end{aligned}$$

gefallen ist. Die Welligkeit  $\Delta U$  der Eingangsspannung wird durch den Regler etwa um den Faktor 47 erniedrigt und macht sich kaum noch bemerkbar. Der Wirkungsgrad ist deutlich höher als beim Regler aus diskreten Bauteilen, aber mit ca. 50% im Schnitt immer noch nicht berauschend. Er steigt, wenn die Differenzspannung zwischen der Eingangs- und Ausgangsspannung sinkt. Dass diese Deutung richtig, zeigt sich, wenn man den Versuch mit einer Ausgangsspannung  $U_a = 9 \text{ V}$  wiederholt. Dann erhält man folgende Messtabelle:

$I_e$ [A]	$U_e$ [V]	$I_a$ [A]	$U_a$ [V]	$P_e$ [W]	$P_a$ [W]	$\eta$ [%]
0,105	16,2	0,1	8,93	1,70	0,89	52,4
0,205	14,9	0,2	8,93	3,05	1,79	58,7
0,305	13,9	0,3	8,91	4,24	2,67	63,0
0,404	12,7	0,4	8,89	5,13	3,56	69,4
0,504	11,9	0,5	8,62	6,00	4,31	71,8

Die Eingangsleistung ist gleich geblieben, die Ausgangsleistung und damit der Wirkungsgrad sind wegen der höheren Ausgangsspannung um ca. 15% gestiegen. Allerdings lässt sich die Effizienz der Schaltung nicht beliebig steigern. Unterschreitet die Differenzspannung zwischen Eingang und Ausgang die minimale Steuerspannung von etwa 3V, so ist die Konstanz der Ausgangsspannung nicht mehr gewährleistet. Sie sinkt. Daher kann man bei optimaler Auslegung der Schaltung abhängig von der Ausgangsspannung nur einen Wirkungsgrad von 60-70% erzielen. Das gilt auch für komplett in einem Gehäuse untergebrachte Regler, wie ich im folgenden Kapitel zeigen werde.

## 2.4 Komplettregler

Im Handel ist eine Vielzahl verschiedenster Spannungsregler erhältlich. Bei allen sind die benötigten Baugruppen in einem Gehäuse untergebracht. Sie sind kurzschlussfest und gegen Überhitzung thermisch abgesichert. Ihr Ausgangstrom ist begrenzt und einige verfügen über einen Überspannungsschutz am Eingang. Anhand dreier Beispiele werde ich die Eigenschaften dieser Regler untersuchen, und zwar an einem sehr gängigen

Regler der Reihe 78xx mit einer festen Ausgangsspannung  $U_a = 9V$ , einem sehr verbreiteten einstellbaren Regler, dem LM 317, dessen Spannung zwischen 1,25 V und 30 V wählbar ist und einem einstellbaren Low-Drop-Regler, dem LT 1085 CT, der ebenfalls eine Ausgangsspannung zwischen 1,25 V und 30V liefern kann.

#### 2.4.1 Regler der Reihe 78xx

Die Regler der 78er Reihe sind in einem TO 92 oder TO 220 Gehäuse untergebracht und können mit einem Dauerstrom von 0,1 A, 1 A und in der S-Version mit 2 A belastet werden. Sie sind für verschiedene feste Spannungen zwischen 5 V und 24 V als Positiv- oder Negativregler erhältlich. Der Hersteller garantiert, dass die wirkliche Ausgangsspannung nur um 3-5% vom Nennwert abweicht. Bei einem 9V-Regler kann sie also maximal zwischen 8,55V und 9,45 V liegen. Die Regler müssen mit zwei externen Kondensatoren beschaltet werden, einem größeren am Eingang von z.B. 1000  $\mu F$  und einem kleineren von 100  $\mu F$  am Ausgang. Abb.1 zeigt den Schaltplan und Abb.2 die Verschaltung auf einer Lochrasterplatine.

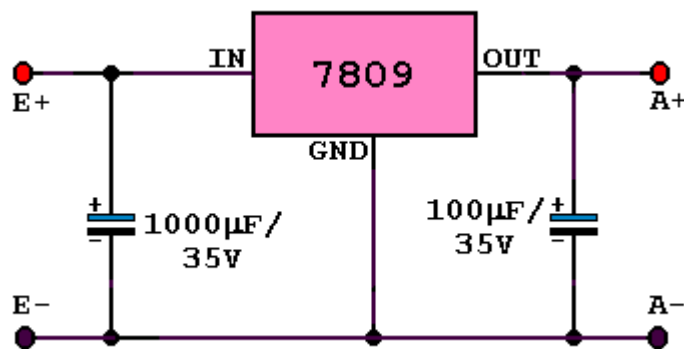


Abb.1: Spannungsregler 7809

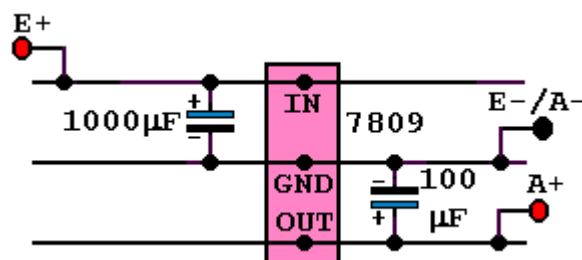


Abb.2: Verschaltung auf einer Lochrasterplatine

Schaut man auf die metallene Rückwand des Reglers und zeigen die Beinchen nach unten, so ist der linke Pin der Ausgang, der mittlere der gemeinsame Minuspol und der rechte der Eingang. Die Platine befestigt man mit zwei Holzschraubchen an zwei Holzleisten, die man auf den Boden einer Ferrero-Rocher-Dose klebt. Im Gehäusedeckel befestigt man zwei rote und eine schwarze Buchse für den Pluspol des Eingangs bzw. Ausgangs und für den gemeinsamen Minuspol. Man verlötet sie mit etwas Schalltlatze mit den entsprechenden Anschlüssen auf der Plati-

ne. Mit der fertigen Schaltung führt man den gleichen Versuch wie in Kapitel 2.2 durch.

**Versuch:**

**Aufbau:**

s. Kapitel 2.2

**Durchführung:**

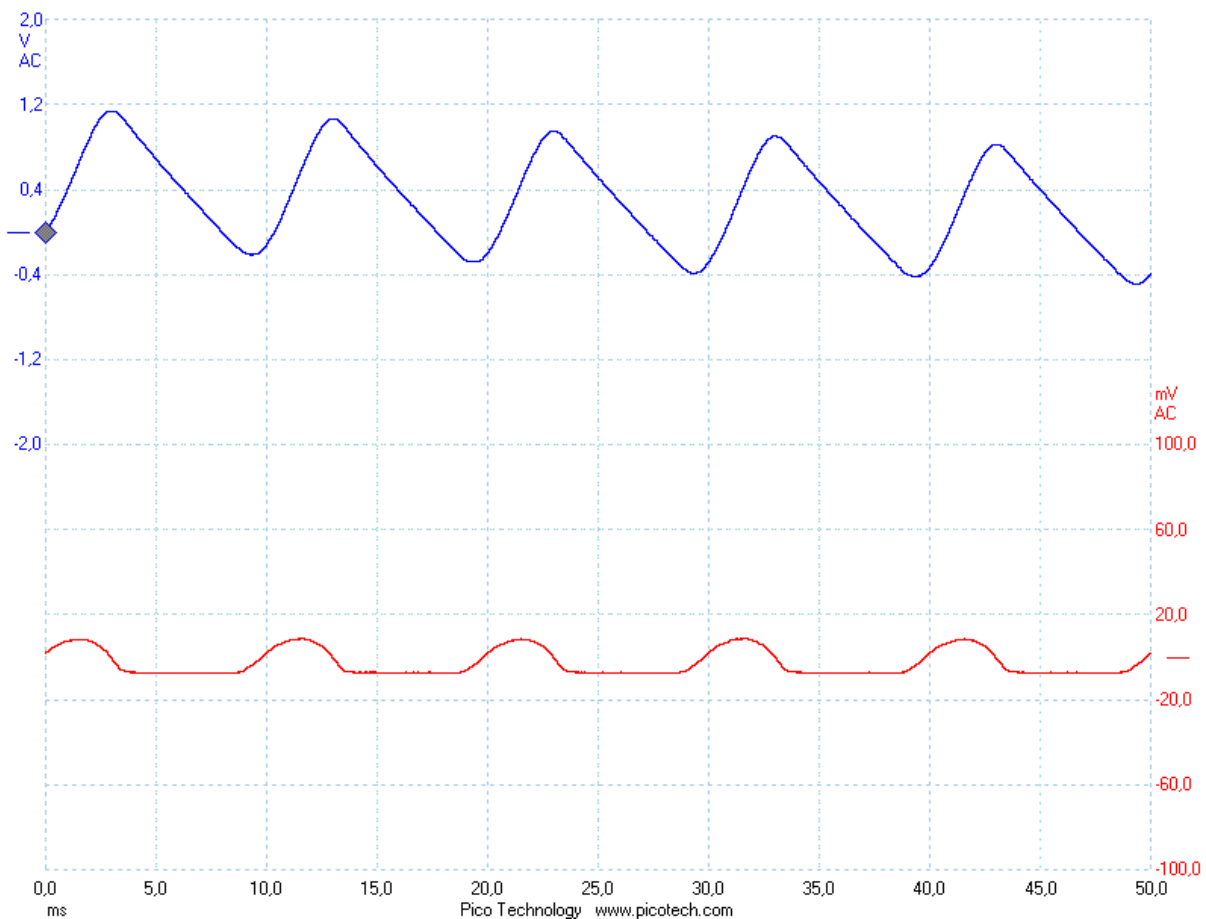
s. Kapitel 2.2

**Ergebnis:**

Man erhält folgende Messtabelle:

$I_e$ [A]	$U_e$ [V]	$I_a$ [A]	$U_a$ [V]	$P_e$ [W]	$P_a$ [W]	$\eta$ [%]
0,107	16,2	0,1	8,87	1,73	0,89	51,4
0,206	14,9	0,2	8,86	3,10	1,77	57,1
0,307	13,8	0,3	8,84	4,24	2,65	62,5
0,407	12,8	0,4	8,83	5,21	3,53	67,8
0,507	12,0	0,5	8,82	6,08	4,41	72,5

Mit dem Picoscope erhält man die Kurven in Abb.3.



**Abb.3: Welligkeit der Eingangs- und Ausgangsspannung**

Aus der oberen Kurve liest man bei einem Ausgangsstrom von  $I_a = 0,3$  A eine Eingangswelligkeit  $\Delta U_e = 1,4$  V und aus der unteren Kurve eine Ausgangswelligkeit von  $\Delta U_a = 20$  mV ab. Sie steigt am



Eingang auf  $\Delta U_e = 2,1 \text{ V}$  und am Ausgang auf  $\Delta U_a = 30 \text{ mV}$ , wenn man den Ausgangsstrom auf  $I_a = 0,5 \text{ A}$  erhöht.

**Folgerung:**

Die Ausgangsspannung bleibt sehr gut konstant. Immerhin sinkt sie bis zur Belastungsgrenze des Netzteiles von  $0,5 \text{ A}$  nur um

$$\begin{aligned} Pr_a &= (8,87\text{V} - 8,82\text{V}) * 100\% / 8,87\text{V} \\ &= 0,56\%, \end{aligned}$$

während die Eingangsspannung um

$$\begin{aligned} Pr_e &= (16,2\text{V} - 12,0\text{V}) * 100\% / 16,2\text{V} \\ &= 25,9\% \end{aligned}$$

gefallen ist. Die Welligkeit  $\Delta U$  der Eingangsspannung wird durch den Regler etwa um den Faktor 70 erniedrigt und macht sich kaum noch bemerkbar. Der Wirkungsgrad ist mit 60% im Schnitt vergleichbar mit dem Wirkungsgrad des selbstgebauten Reglers. Mehr ist mit herkömmlichen Spannungsreglern in der Praxis nicht machbar, wenn die Ausgangsspannung auf 1% konstant bleiben soll. Nur Low-Drop-Regler oder Schaltregler nutzen die Energie effizienter, wie in den folgenden Kapitel gezeigt wird.

**2.4.2 Einstellbarer Regler LM 317**

Der Regler LM 317 wird vielfach in regelbaren Netzgeräten eingesetzt. Er liefert an seinem Ausgang eine gut geglättete Gleichspannung. Es gibt ihn in verschiedenen Ausführungen zu kaufen. Die preiswerteste Variante trägt die Bezeichnung LM 317 LP und hat die Ausgangsdaten  $1,2\text{V} - 32\text{V}$  bei  $I_{\max} = 0,1\text{A}$ , die zweite LM 317 K liefert am Ausgang  $1,2\text{V} - 32\text{V}$  bei  $I_{\max} = 1,5\text{A}$ , die dritte LM 317 T  $1,2\text{V} - 37\text{V}$  bei  $I_{\max} = 1,5\text{A}$ . Den benötigten Schaltplan zeigt Abb.1.

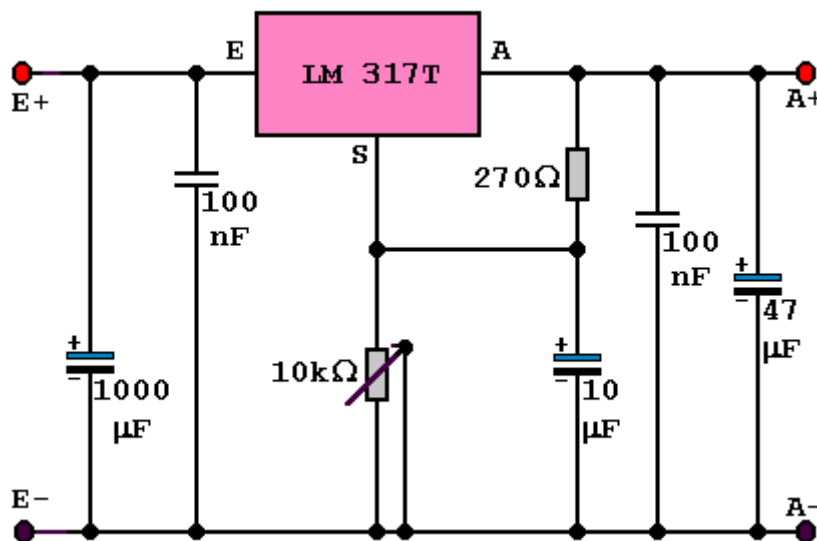
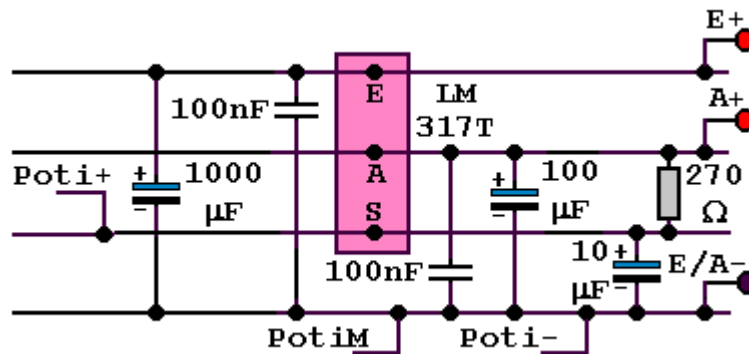


Abb.1: Schaltplan LM 317 T

Die Verschaltung auf einer Lochrasterplatine entnehmen Sie Abb.2.



**Abb.2: Verschaltung des LM 317 T auf einer Lochrasterplatine**

Die Platine befestigt man mit zwei Holzschraubchen an zwei Holzleisten, die man auf den Boden einer Ferrero-Rocher-Dose klebt. Im Gehäusedeckel befestigt man zwei rote und eine schwarze Buchse für den Pluspol des Eingangs bzw. Ausgangs und für den gemeinsamen Minuspol und das Potentiometer. Man verlötet sie mit etwas Schalltltze mit den entsprechenden Anschlüssen auf der Platine. Mit der fertigen Schaltung führt man den gleichen Versuch wie in Kapitel 2.2 durch.

**Versuch:**

**Aufbau:**

s. Kapitel 2.2

**Durchführung:**

Als Ausgangsspannung stellt man am Regler  $U_a = 9V$  ein. Das weitere Vorgehen entnehmen Sie Kapitel 2.2

**Ergebnis:**

Man erhält folgende Messtabelle:

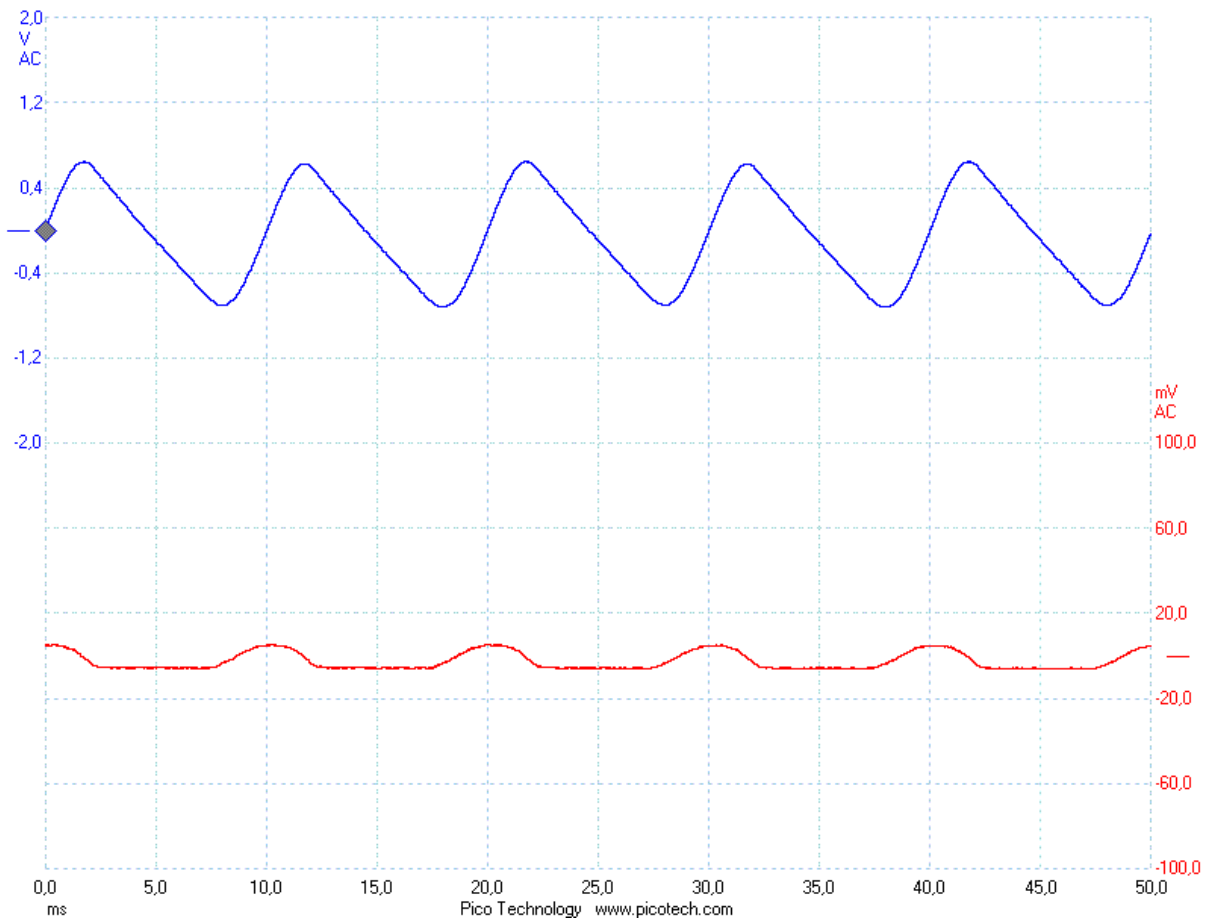
$I_e$ [A]	$U_e$ [V]	$I_a$ [A]	$U_a$ [V]	$P_e$ [W]	$P_a$ [W]	$\eta$ [%]
0,104	16,1	0,1	9,02	1,67	0,90	53,9
0,204	15,0	0,2	9,02	3,06	1,80	58,8
0,305	13,9	0,3	9,02	4,24	2,71	63,9
0,404	12,9	0,4	9,02	5,21	3,61	69,3
0,505	12,0	0,5	9,02	6,06	4,51	74,4

Das Picoscope zeichnet die Kurven in Abb.3 auf. Aus der oberen Kurve liest man bei einem Ausgangsstrom von  $I_a = 0,3 A$  eine Eingangswelligkeit  $\Delta U_e = 1,4 V$  und aus der unteren Kurve eine Ausgangswelligkeit von  $\Delta U_a = 10 mV$  ab. Sie steigt am Eingang auf  $\Delta U_e = 2,1 V$  und am Ausgang auf  $\Delta U_a = 20 mV$ , wenn man den Ausgangsstrom auf  $I_a = 0,5 A$  erhöht.

**Folgerung:**

Die Ausgangsspannung bleibt sehr gut konstant. Sie ändert sich bis zu einem Ausgangsstrom  $I_a = 0,5 A$  nicht. Der Wirkungsgrad

entspricht in etwa dem des Festreglers 7809, da beide nur einen geringen Steuerstrom benötigen.



**Abb.3: Welligkeit der Eingangs- und Ausgangsspannung**

### 2.4.3 Low-Drop-Regler LD 1117V30

Einen besseren Wirkungsgrad erzielt man unter gewissen Voraussetzungen mit so genannten Low-Drop-Reglern. Sie benötigen nur eine Steuerspannung von ca.  $U_R = 1\text{ V}$ . Die Regler sind in einem TO 92 oder TO 220 Gehäuse untergebracht und können je nach Typ mit einem Dauerstrom von bis zu 7A belastet werden. Sie sind für verschiedene feste Spannungen zwischen 3V und 12V als Positiv- oder Negativregler erhältlich. Auch einstellbare Varianten werden angeboten. Die Hersteller garantieren, dass die wirkliche Ausgangsspannung nur um 3-5% vom Nennwert abweicht und die Steuerspannung 1,2 V nicht übersteigt, selbst bei höchster Belastung. Die Regler können, müssen aber nicht immer mit zwei externen Kondensatoren beschaltet werden, einem größeren am Eingang von z.B. 1000  $\mu\text{F}$  und einem kleineren von 100  $\mu\text{F}$  am Ausgang. Bei einigen Modellen genügen auch wesentlich kleinere Kondensatoren am Ein- und Ausgang. Abb.1 zeigt den Schaltplan und Abb.2 die Verschaltung auf einer Lochrasterplatine am Beispiel des Festspannungsreglers LD1117V30. Schaut man auf die metallene Rückwand des Reglers und zeigen die Beinchen nach unten, so ist der linke Pin der Eingang, der mittlere der Ausgang und der rechte der gemeinsame Minuspol. Die Platine befestigt man mit zwei Holzschraubchen an zwei Holz-

leisten, die man auf den Boden einer Ferrero-Rocher-Dose klebt. Im Gehäusedeckel befestigt man zwei rote und eine schwarze Buchse für den Pluspol des Eingangs bzw. Ausgangs und für den gemeinsamen Minuspol. Man verlötet sie mit etwas Schalllitze mit den entsprechenden Anschlüssen auf der Platine. Mit der fertigen Schaltung führt man den gleichen Versuch wie in Kapitel 2.2 durch.

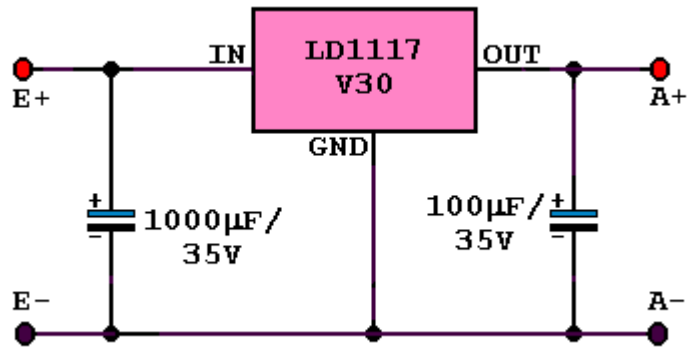


Abb.1: Low-Drop-Regler LD 1117V30

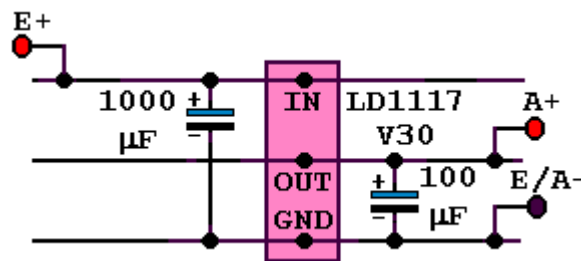


Abb.2: Verschaltung auf einer Lochrasterplatine

### Versuch 1:

#### **Aufbau:**

s. Kapitel 2.2

#### **Durchführung:**

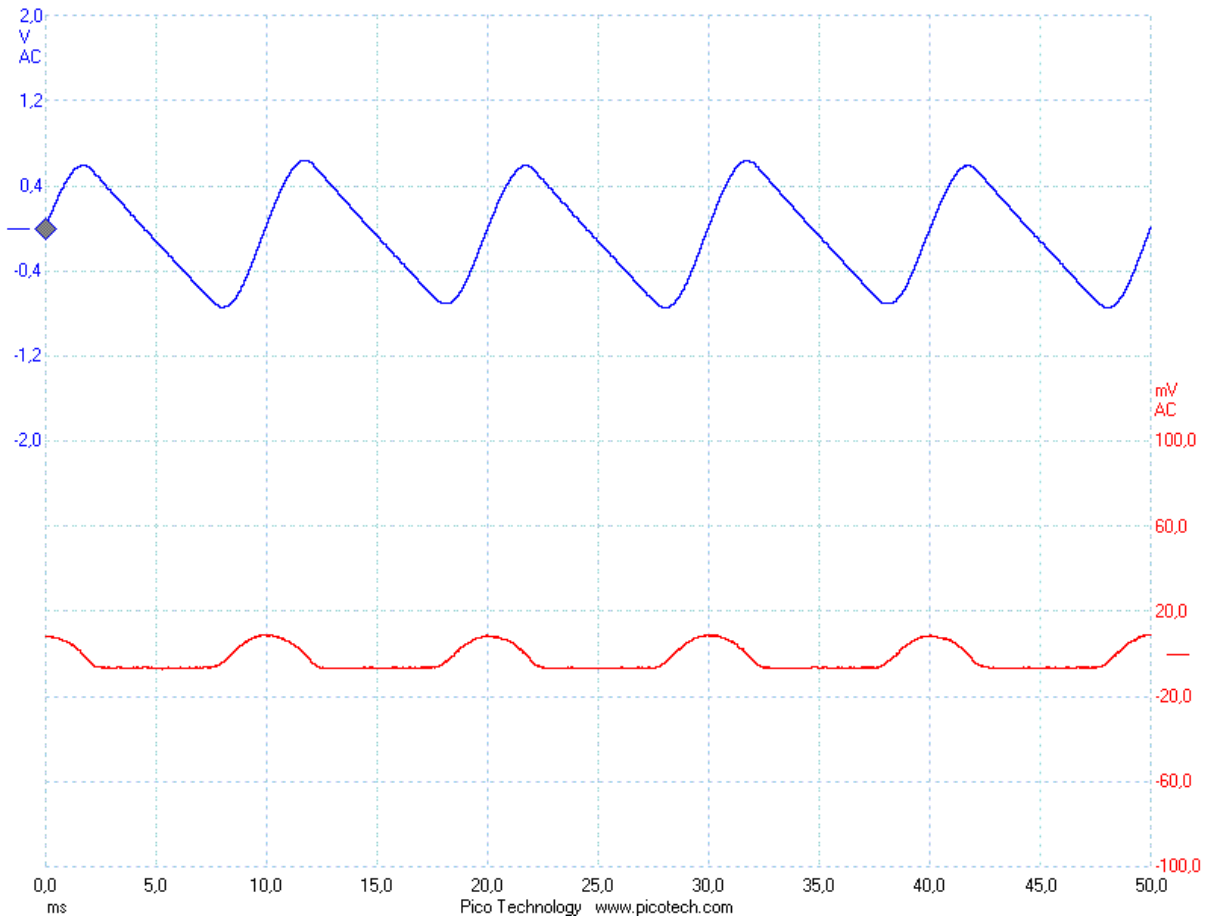
Das Netzteil wird auf eine Ausgangsspannung von 4,5 V gestellt. Ansonsten geht man wie in Kapitel 2.2 vor.

#### **Ergebnis:**

Man erhält folgende Messtabelle:

$I_e$ [A]	$U_e$ [V]	$I_a$ [A]	$U_a$ [V]	$P_e$ [W]	$P_a$ [W]	$\eta$ [%]
0,103	7,18	0,1	3,02	0,74	0,30	40,5
0,204	6,59	0,2	3,02	1,34	0,60	44,8
0,305	6,05	0,3	3,02	1,85	0,91	49,2
0,404	5,61	0,4	3,02	2,27	1,21	53,3
0,503	5,17	0,5	3,02	2,60	1,51	58,1
0,604	4,90	0,6	2,98	2,96	1,79	60,5
0,705	4,40	0,7	2,90	3,10	2,03	65,5

Mit dem Picoscope erhält man die Kurven in Abb.3.



**Abb.3: Welligkeit der Eingangs- und Ausgangsspannung**

Aus der oberen Kurve liest man bei einem Ausgangsstrom von  $I_a = 0,3 \text{ A}$  Kurve eine Eingangswelligkeit  $\Delta U_e = 1,4 \text{ V}$  und aus der unteren Kurve eine Ausgangswelligkeit von  $\Delta U_a = 15 \text{ mV}$  ab. Sie steigt am Eingang auf  $\Delta U_e = 2,1 \text{ V}$  und am Ausgang auf  $\Delta U_a = 25 \text{ mV}$ , wenn man den Ausgangsstrom auf  $I_a = 0,5 \text{ A}$  erhöht.

**Folgerung:**

Die Ausgangsspannung bleibt bis nahe an die Belastungsgrenze des Reglers von  $0,8 \text{ A}$  recht gut konstant. Sie sinkt nur um

$$\begin{aligned} Pr_a &= (3,02\text{V} - 2,90) \cdot 100\% / 3,02\text{V} \\ &= 4\%, \end{aligned}$$

bis zur eigentlichen Auslegungsgrenze des Netzteiles von  $0,5 \text{ A}$  sogar überhaupt nicht. Die Eingangsspannung ist dann bereits um

$$\begin{aligned} Pr_e &= (7,18\text{V} - 5,17) \cdot 100\% / 5,17\text{V} \\ &= 28\% \end{aligned}$$

gefallen. Die Welligkeit  $\Delta U$  der Eingangsspannung wird durch den Regler etwa um den Faktor 90 erniedrigt und macht sich kaum noch bemerkbar. Der Wirkungsgrad scheint auf den ersten Blick mit 55% im Schnitt unter dem des herkömmlichen Reglers LM 317 zu liegen. Allerdings muss man beachten, dass eine

niedrigere Ausgangsspannung entnommen wurde und der Wirkungsgrad daher naturbedingt insgesamt niedriger ausfällt. Um diesen Effekt auszugleichen, wiederholt man den Versuch mit dem Spannungsregler LM 317 T bei einer Ausgangsspannung  $U_a = 3V$ .

### **Versuch 2:**

#### **Aufbau:**

s. Kapitel 2.2

#### **Durchführung:**

Das Netzteil wird auf eine Ausgangsspannung von 4,5 V gestellt, der Regler LM 317 T auf eine Ausgangsspannung  $U_a = 3V$ . Ansonsten geht man wie in Kapitel 2.2 vor.

#### **Ergebnis:**

Man erhält folgende Messtabelle:

$I_e$ [A]	$U_e$ [V]	$I_a$ [A]	$U_a$ [V]	$P_e$ [W]	$P_a$ [W]	$\eta$ [%]
0,104	7,17	0,1	3,07	0,75	0,31	41,3
0,205	6,59	0,2	3,06	1,35	0,61	45,2
0,304	6,03	0,3	3,06	1,83	0,92	50,3
0,404	5,55	0,4	3,05	2,24	1,21	54,0
0,505	5,14	0,5	2,87	2,60	1,44	55,4
0,605	4,90	0,6	2,56	2,96	1,60	54,1
0,705	4,40	0,7	2,42	3,10	1,69	54,5

#### **Folgerung:**

Vergleicht man diese Tabelle mit der Tabelle für den Low-Drop-Regler, so werden die Vorzüge eines LD-Reglers deutlich. Sobald die Eingangsspannung nur noch etwa 2V über der Ausgangsspannung liegt, hat der herkömmliche Regler Probleme. Die Ausgangsspannung sinkt und der Wirkungsgrad liegt unter dem des LD-Reglers. Ein Low-Drop-Regler kommt mit einer geringeren Steuerspannung aus. Sein Wirkungsgrad übersteigt dann den eines herkömmlichen Reglers. Das macht der folgende Versuch sehr deutlich.

### **Versuch 3:**

#### **Aufbau:**

s. Kapitel 2.2

#### **Durchführung:**

Man ersetzt das Netzteil durch eine regelbare Gleichspannungsquelle. Als Regler verwendet man zuerst den LD 1117 V30 und dann den LM 317 T bei einer Ausgangsspannung von 3V. Man stellt bei beiden einen Ausgangsstrom von 0,1 A ein und regelt die Eingangsspannung so weit herunter, bis die Ausgangsspannung gerade zu fallen beginnt. Man liest die Werte ab und erhöht den Ausgangsstrom bis auf 0,5 A in Schritten von 0,1 A.

#### **Ergebnis:**

Man erhält die Messtabellen auf der folgenden Seite.

#### **Folgerung:**

Der Wirkungsgrad des LD-Reglers ist um ca. 10% höher als der eines herkömmlichen Reglers bei gleicher Ausgangsleistung  $P_a$ . Das gilt aber nur, wenn die Eingangsspannung  $U_e$  die Ausgangs-

spannung  $U_a$  nur um die Steuerspannung  $U_R$  des Reglers übersteigt. Liegt sie über der Summe aus Ausgangsspannung und Steuerspannung, so bieten die LD-Regler keinen Vorteil mehr, weil der Regler unabhängig von seiner Bauart die überschüssige Energie abführen muss (s. Versuch 1 und Versuch 2). Insgesamt bestätigen die Messergebnisse die theoretischen Überlegungen aus Kapitel 2.1 in glänzender Weise.

$I_e$ [A]	$U_e$ [V]	$I_a$ [A]	$U_a$ [V]	$P_e$ [W]	$P_a$ [W]	$\eta$ [%]
0,104	4,06	0,1	3,02	0,42	0,30	71,4
0,205	4,06	0,2	3,02	0,83	0,60	72,3
0,303	4,06	0,3	3,02	1,23	0,91	74,0
0,404	4,06	0,4	3,00	1,64	1,20	73,2
0,505	4,06	0,5	2,98	2,05	1,49	72,7

**Messtabelle LD 1117V30**

$I_e$ [A]	$U_e$ [V]	$I_a$ [A]	$U_a$ [V]	$P_e$ [W]	$P_a$ [W]	$\eta$ [%]
0,104	4,85	0,1	3,08	0,50	0,31	62,0
0,203	4,85	0,2	3,07	0,98	0,61	62,2
0,305	4,85	0,3	3,06	1,48	0,92	62,2
0,404	4,85	0,4	3,05	1,96	1,22	62,2
0,504	4,85	0,5	2,93	2,44	1,53	62,7

**Messtabelle LM 317T**

## 2.5 Verschiedenes

### 2.5.1 Grundlagen

Im Laufe der Zeit wurden für die Spannungsregler Erweiterungen und Schutzschaltungen entwickelt, die z. T. heute in Kompletregler bereits enthalten sind, aber bei Bedarf auch extern in die Schaltung integriert werden können. Obwohl es heute eine Vielzahl verschiedenster Spannungsregler für diverse Spannungen und Ströme zu kaufen gibt, kann es schon mal vorkommen, dass man den passenden gerade nicht zur Hand hat. Mit ein paar externen Bauteilen kann man die Ausgangsspannung und den Ausgangsstrom eines Reglers erhöhen. Abb.1 zeigt, wie man den Ausgangsstrom und Abb.2, wie man den Ausgangsstrom anheben kann. Durch geeignete Wahl der Zenerdiode im Steuereingang bzw. der Minusleitung M des Reglers kann die Ausgangsspannung  $U_a$  bei sonst gleichen Eigenschaften um die Spannung  $U_{zD}$  der Zenerdiode angehoben werden. Natürlich muss auch die Eingangsspannung entsprechend angepasst werden. Bei der Schaltung nach Abb.2 wird der Transistor  $T_1$  leitend, wenn die Spannung am Widerstand  $R_1$  einen bestimmten Wert übersteigt, der von der Auslegung des Transistors  $T_1$  und des Widerstandes  $R_2$  abhängt. Er liefert dann einen zusätzlichen Ausgangsstrom. Transistor  $T_2$  macht Transistor  $T_1$  und damit die ganze Schaltung kurzschlussfest, da der Regler intern gegen einen zu hohen Strom abgesichert ist. Er schaltet durch, wenn die Spannung an  $R_2$  etwa der

Emitter-Basis-Spannung von  $T_2$  entspricht. Damit wird die Emitter-Basis-Spannung an  $T_1$  begrenzt. Es kann auch sinnvoll sein, einen Nebenzweig für den Strom aufzubauen, um sich einen Kühlkörper für den Regler zu ersparen. Man dimensioniert die Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  so, dass sich der Ausgangsstrom passend auf den Regler und den Transistor  $T_1$  verteilt, dass beide ohne Kühlkörper betrieben werden können. Für einen Negativregler benötigt man zwei npn-Transistoren. Ein konkretes Beispiel wird im folgenden Kapitel vorgestellt.

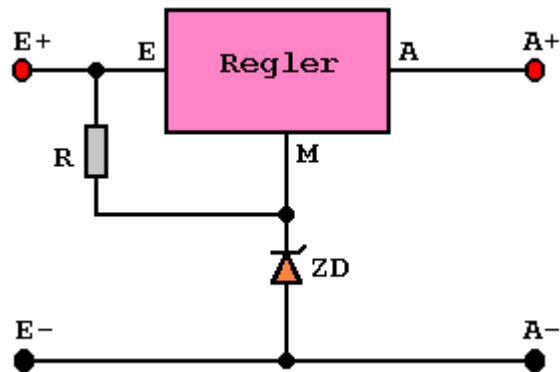


Abb.1: Spannungserweiterung

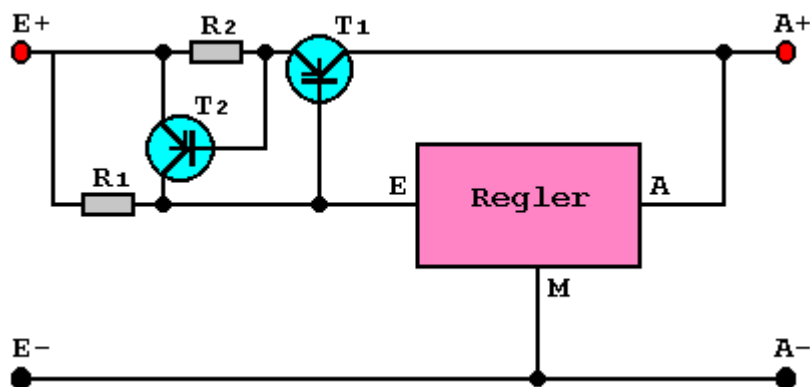
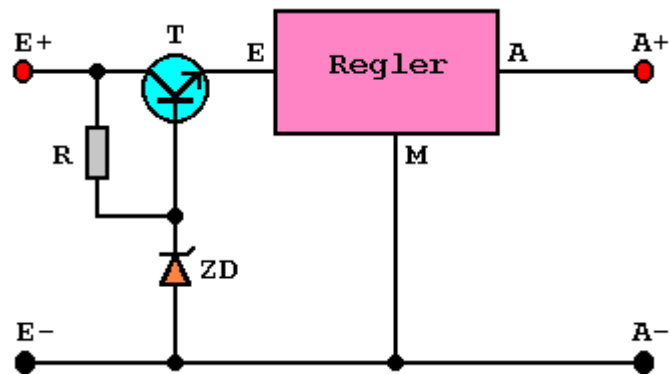


Abb.2: Stromerweiterung

Zwei Schutzschaltungen für die Spannungsregler seien noch erwähnt. Manchmal liegt die Eingangsspannung weit über der Ausgangsspannung, ab und zu sogar über dem zulässigen Eingangswert des Reglers, weil der vorgeschaltete Trafo eine feste Ausgangsspannung liefert. Dann kann man den Regler durch einen Transistor am Eingang gemäß Abb.3 schützen. Die Zenerdiode begrenzt die Eingangsspannung des Reglers auf die Zenerspannung abzüglich der Basis-Emitter-Spannung des Transistors  $T$ . Dabei muss man allerdings beachten, dass der Transistor die Überschussleistung aufnehmen muss und sehr heiß werden kann. Er muss gegebenenfalls mit einem Kühlkörper versehen werden. Andererseits kann man durch geeignete Wahl der Zenerdiode die Verlustleistung gleichmäßig auf den Vortransistor und den Regler verteilen, so dass beide unter Umständen ohne Kühlkörper auskommen. Auf keinen Fall kann man beide an einem gemeinsamen

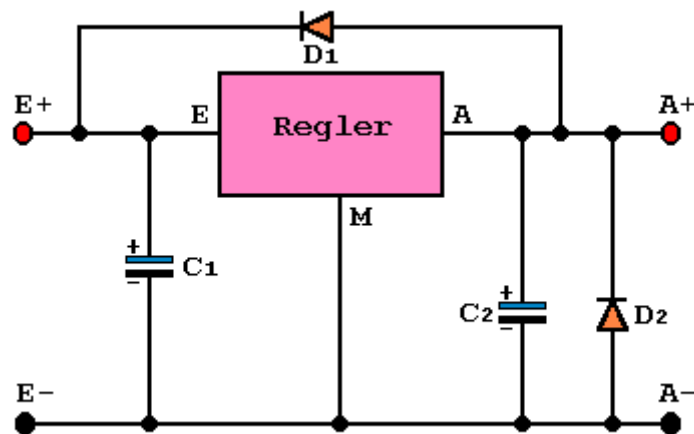


Kühlkörper befestigen, da unterschiedliche Anschlüsse mit dem Metallgehäuse verbunden sind.



**Abb.3: Schutz des Reglers vor Überspannung**

Abb.4 zeigt eine weitere häufig eingesetzte Schutzschaltung.



**Abb.4: Schutz vor Verpolung**

Im Betrieb laden sich die beiden Kondensatoren  $C_1$  und  $C_2$  am Eingang bzw. Ausgang auf, beim Ausschalten entladen sie sich. Dabei kann es passieren, dass sich der Eingangskondensator  $C_1$  schneller entlädt als der Ausgangskondensator  $C_2$ . Die Spannung am Ausgang würde die Spannung am Eingang übersteigen, was den Regler zerstören kann. Diesen Fall unterbindet die Diode  $D_1$ . Sie wird leitend und Kondensator  $C_2$  entlädt sich über den gleichen Stromzweig wie Kondensator  $C_1$ . Außerdem schützt sie den Regler, wenn man den Eingang und den Ausgang des Reglers verwechselt.  $D_2$  verhindert eine ausgangsseitige Falschpolung, auf die einige Spannungsregler sehr empfindlich reagieren, in dem sie den Geist aufgeben.

### 2.5.2 Schaltungen

Abb.1 zeigt eine konkrete Schaltung, mit der man die Ausgangsspannung eines Reglers 7805 von 5V auf 8V erhöhen kann. Dazu dient die Zenerdiode in der Steuerleitung des Reglers von 3V. Gleichzeitig übernimmt der Vortransistor BD 135 einen Teil der

Eingangsspannung  $U_E$  und entlastet so den Regler, wenn sie  $U_E = 12\text{ V}$  übersteigt. Dieser Fall sollte in der Praxis nach Möglichkeit vermieden werden, weil der Wirkungsgrad der Schaltung drastisch sinkt, wie in Kapitel 2.1 gezeigt wurde. Manchmal lässt es sich aber nicht vermeiden, da keine kleinere Eingangsspannung zur Verfügung steht. Die beiden Dioden 1N4001 schützen den Regler vor falscher Polung.

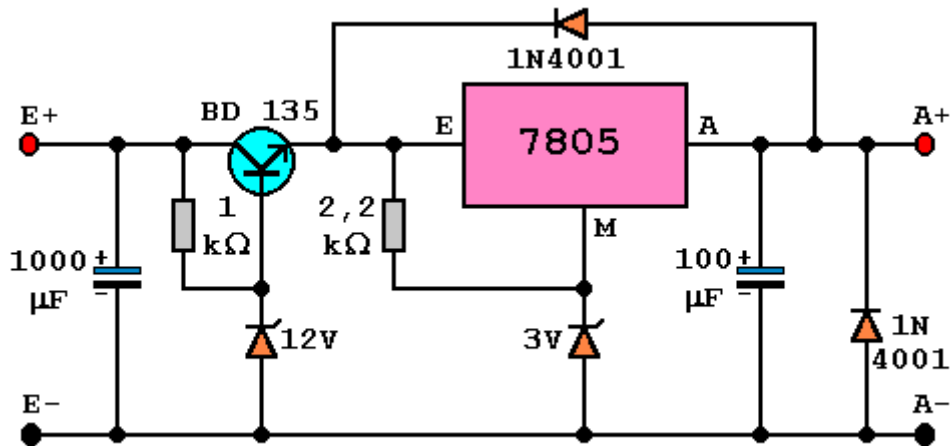


Abb.1: Erweiterungen zum Regler 7805

In Abb.2 ist eine Schaltung zu sehen, mit der man den Ausgangsstrom des selbstgebauten Reglers erhöhen kann.

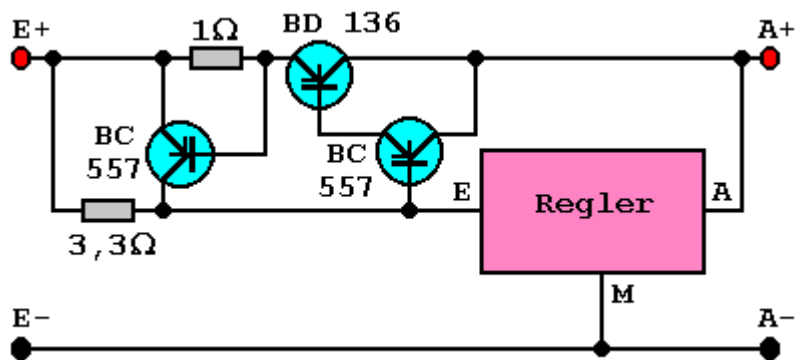


Abb.2: Erhöhung des Ausgangsstromes

Übersteigt der Strom durch den Regler einen Wert von

$$I_R = 1,3\text{V}/3,3\Omega \\ = 0,4\text{ A,}$$

so schaltet der Darlingtontransistor, bestehend aus einem BD 136 und einem BC 557 immer mehr durch, da die Basis-Emitter-Spannung überschritten wird. Der Eingangstrom fließt z. T. am Regler vorbei direkt zum Ausgang A+. Trotzdem behält die Ausgangsspannung den Wert, auf den der Regler sie begrenzt. Liegt der Strom durch diesen Transistor über

$$\begin{aligned} I_1 &= 0,65\text{V}/1\Omega \\ &= 0,65\text{A}, \end{aligned}$$

so wird der zweite Transistor BC 557 leitend und schließt die Nebenstromleitung kurz. Da der Regler ab einem Strom

$$I_2 = 0,65\text{V}/1\Omega$$

ebenfalls abschaltet (s. Abb.1 Kapitel 2.3), ist die gesamte Schaltung ab einem Strom

$$\begin{aligned} I_{\text{ges}} &= I_1 + I_2 \\ &= 1,3 \text{ A} \end{aligned}$$

kurzschlussfest. Um diesen Zustand aufrecht zu erhalten, muss der untere Widerstand einen Wert

$$\begin{aligned} R &= (1,3\text{V} + 0,65\text{V})/0,65\text{A} \\ &= 3 \Omega \end{aligned}$$

haben. Erwerben kann man  $3,3 \Omega$ , weshalb ich diesen Wert in der Schaltung eingebaut habe. An ihm fallen dann die Basis-Emitter-Spannungen des Darlingtontransistors und des Schutztransistors BC 557 ab.

### 3. Schaltregler

#### 3.1 Grundlagen

Wesentlich effizienter mit Wirkungsgraden zwischen 70% und 97% arbeiten so genannte Schaltregler. In ihnen wird die Gleichspannung der Stromquelle mit einer hohen Frequenz zwischen 10kHz und 500kHz ständig ein- und ausgeschaltet, also zerhackt. Während der Einschaltphasen wird Energie in kleinen Portionen von der Stromquelle zu einem Zwischenspeicher gepumpt. Er besteht aus einer Spule, die mit einer Diode und dem Verbraucher in Reihe geschaltet ist. Meist liegt parallel zum Verbraucher noch ein Kondensator, der den Strom glättet. Die Diode sorgt dafür, dass der Strom nur in eine Richtung fließen kann. Schließlich benötigt die LED Gleichstrom. Je nach Anordnung der Bauteile können Gleichspannungen hoch- bzw. runtergeregelt werden. Die grundsätzlichen Vorgänge machen die Schaltungen in Abb. 1 deutlich. Bei 1a) handelt es sich um einen Abwärtsregler, bei 1b) um einen Aufwärtsregler, d.h. bei der Schaltung in Abb. 1a ist die Ausgangsspannung  $U_a$  kleiner als die Eingangsspannung  $U_e$ , bei 1b ist es umgekehrt.

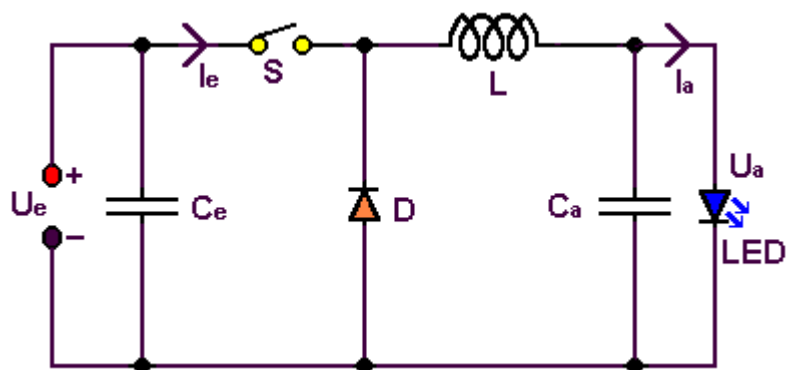


Abb.1a: Abwärtsregler

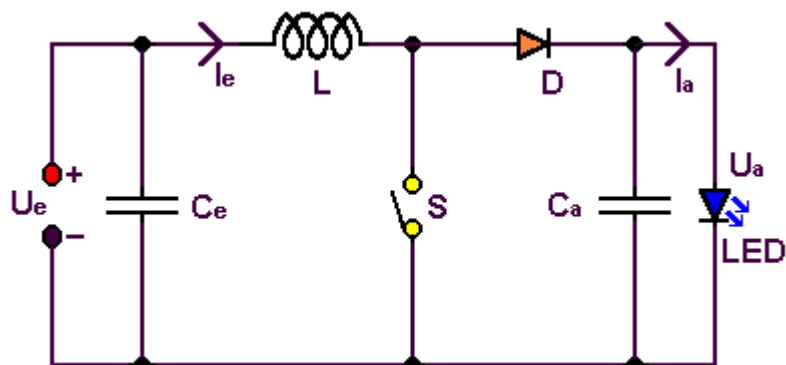


Abb.1b: Aufwärtsregler

Ist in Abb. 1a der Schalter S geschlossen, so fließt ein exponentiell ansteigender Strom durch die Spule. Er baut in ihr ein Magnetfeld auf, bringt die LED zum Leuchten und lädt den

Kondensator auf. Öffnet man den Schalter, so treiben die Energien des Magnetfeldes in der Spule und des elektrischen Feldes im Kondensator den Strom durch die LED und die Diode weiter an. Er wird jedoch exponentiell kleiner, da beide Felder sich mehr und mehr abbauen. Schließt man den Schalter wieder, so beginnt das ganze Spiel von vorn. Da die Spule nur während der Einschaltphase mit der Stromquelle verbunden ist, ist die Ausgangsspannung  $U_a$  geringer als die Eingangsspannung  $U_e$ , bei gleichlanger Ein- und Ausschaltphase und nicht zu großer Last etwa halb so groß.

Ist beim Aufwärtsregler nach Abb. 1b der Schalter S geschlossen, so baut sich in der Spule ein Magnetfeld auf. Die gespeicherte Energie im Feld ist größer als beim Abwärtsregler, da die Spule direkt ohne zusätzlichen Verbraucher mit der Stromquelle verbunden ist. Öffnet man den Schalter, so bricht das Magnetfeld der Spule zusammen. Sie wird zur zusätzlichen Stromquelle und treibt zusammen mit der externen Stromquelle einen Strom durch die Diode. Die LED leuchtet und der Kondensator lädt sich auf. Schließt man den Schalter wieder, so hält die Ladung im Kondensator den Strom durch die LED aufrecht. Fehlt er, so sinkt die Ausgangsspannung während der Einschaltphase des Schalters auf 0V. Er ist beim Aufwärtsregler zwingend notwendig, um einen ständigen Stromfluss durch die LED zu gewährleisten. Da beim Aufwärtsregler in jeder Einschaltphase viel Energie in der Spule gespeichert wird, übersteigt die mittlere Ausgangsspannung die Eingangsspannung, auch wenn während der Schließzeit des Schalters keine Energie zur LED gepumpt wird. Dafür werden sie und der Kondensator in der Ausschaltzeit mit einer Spannung versorgt, die die Eingangsspannung bei weitem übertrifft.

Für beide Schaltungen gilt: Variiert man die Länge der Ein- und Ausschaltphasen, so wird pro Zyklus mehr oder weniger Energie in den Speicherkreis gepumpt. Der Strom durch den Verbraucher steigt bzw. sinkt.

In der Praxis ersetzt man den Schalter durch einen Transistor, der mit einer Rechteckspannung an seiner Basis ein- und ausgeschaltet wird. Das zeigen die folgenden Versuche mit den Schaltungen nach Abb. 1c und Abb. 1d.

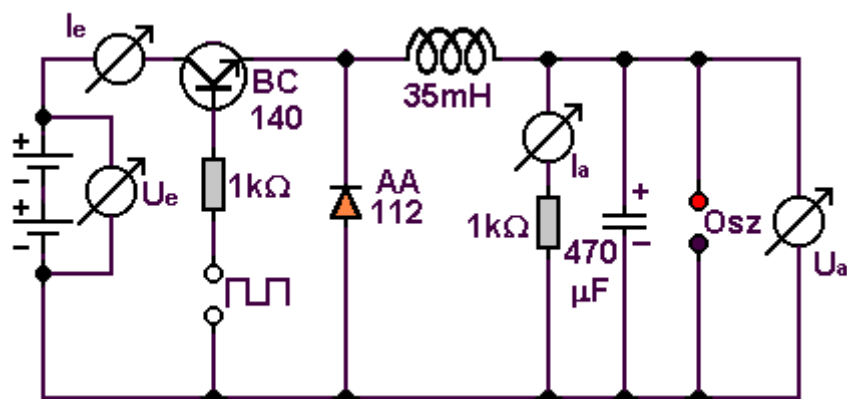


Abb. 1c: Versuchsaufbau Abwärtsregler

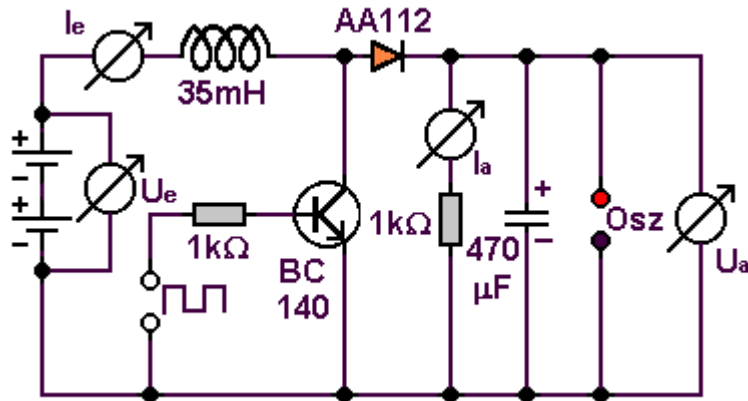


Abb.1d: Versuchsaufbau Aufwärtsregler

### **Versuch 1:**

#### **Durchführung:**

Man baut die Schaltung nach Abb. 1c auf und schaltet alle Geräte ein. Als Rechteckgenerator benutzt man den Funktionsgenerator der Firma Phywe oder der Firma Leybold, die an einem Ausgang ein rechteckförmiges Signal liefern. Die Frequenz beträgt zu Beginn 5kHz, wird dann im zweiten Teil auf 25 kHz erhöht. Als Spule kann man die große Leybold-Spule mit 1000 Windungen einsetzen, die zwar laut Aufschrift eine Induktivität  $L = 0,044\text{H}$  besitzen soll, aber es in Wirklichkeit nur auf  $L = 0,035\text{H}$  bringt, wie man mit einem Induktivitätsmessgerät zeigen kann. Man fährt die Spannung am Rechteckgenerator hoch. Anschließend entfernt man für einen Moment den Lastwiderstand  $1\text{k}\Omega$  bzw. den Kondensator  $470\ \mu\text{F}$ .

#### **Beobachtung:**

Am Anfang liegt am Ausgang keine Spannung an, da der Transistor sperrt. Fährt man die Rechteckspannung mit  $f = 5\text{kHz}$  hoch, so zeigt das Voltmeter bzw. der Oszillograph nach kurzer Zeit eine konstante Spannung  $U_a = 1,1\text{V}$  an. Entfernt man den Kondensator, so steigt die Ausgangsspannung  $U_a$  während der Einschaltzeit des Transistors exponentiell von  $0\text{V}$  auf  $2,2\text{V}$  an, in der Ausschaltphase fällt sie exponentiell wieder auf  $0\text{V}$  ab. Entfernt man den Lastwiderstand, so liegen am Ausgang nach kurzer Zeit konstant  $2,2\text{V}$  an. Erhöht man die Frequenz der Steuerungsspannung auf  $f = 25\text{kHz}$ , so schwankt die Ausgangsspannung ohne Ausgangskondensator um  $1,1\text{V}$ , in der Einschaltphase steigt sie allmählich auf  $1,6\text{V}$  an, während der Ausschaltphase des Transistors fällt sie auf  $0,6\text{V}$  ab. Der Mittelwert beträgt nach wie vor  $1,1\text{V}$ . Die genauen Spannungsverläufe entnehmen Sie den Graphiken in Abb. 1e und 1f. Die roten Linien zeigen den Verlauf ohne Kondensator, die blauen Linien mit Glättungskondensator.

#### **Ergebnis:**

Im normalen Betrieb mit Kondensator und Lastwiderstand misst man folgende Werte:

$$U_e = 2,5\text{V}$$

$$I_e = 0,55\text{mA}$$

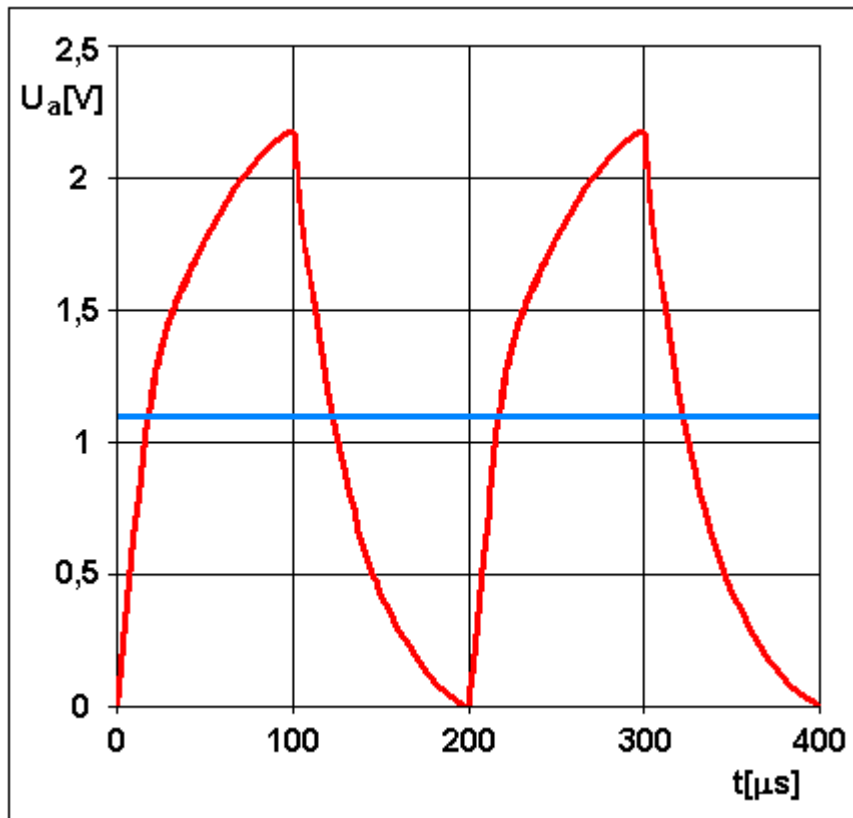


Abb.1e: Abwärtsregler  $f = 5 \text{ kHz}$

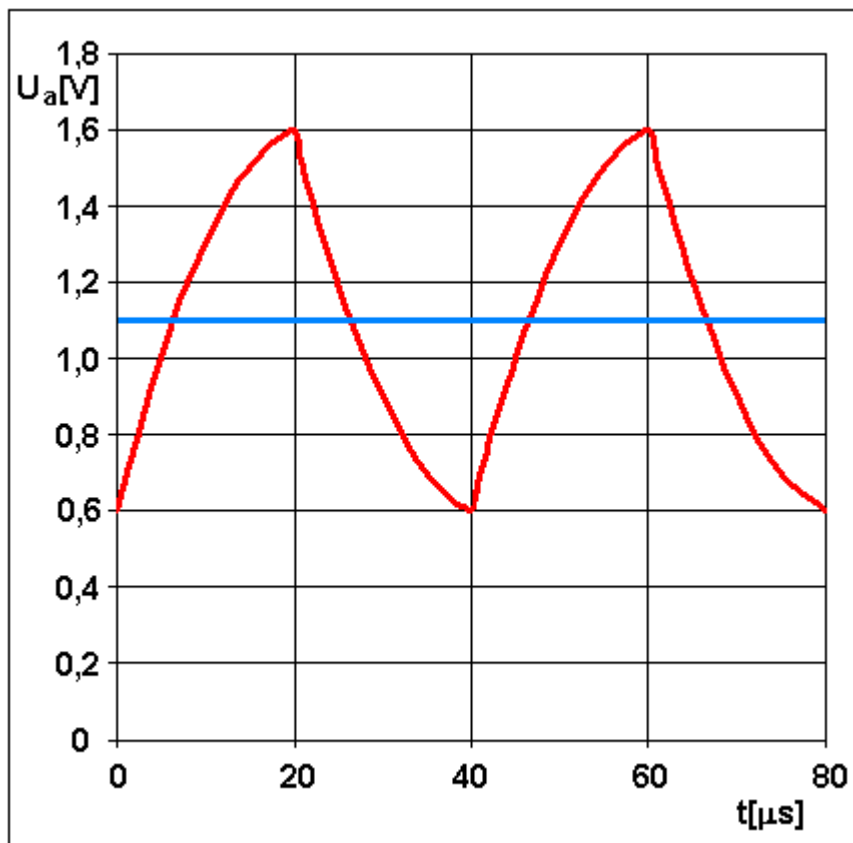


Abb.1f: Abwärtsregler  $f = 25 \text{ kHz}$

$$U_a = 1,1V$$
$$I_a = 1,1mA.$$

**Auswertung:**

Damit erhält man für die Leistungen:

$$P_e = U_e \cdot I_e$$
$$= 2,5V \cdot 0,55mA$$
$$= 1,375mW$$
$$P_a = U_a \cdot I_a$$
$$= 1,1V \cdot 1,1mA$$
$$= 1,21mW$$

und für den Wirkungsgrad  $\eta$

$$\eta = P_a \cdot 100\% / P_e$$
$$= 88\%.$$

**Versuch 2:****Durchführung:**

Man baut den Versuch nach Abb. 1d auf und schaltet alle Geräte ein. Man fährt die Spannung am Rechteckgenerator mit  $f = 5kHz$  hoch. Anschließend entfernt man für einen Moment den Lastwiderstand  $1k\Omega$  bzw. den Kondensator  $470 \mu F$ . Dann erhöht man die Frequenz auf  $f = 25kHz$ .

**Beobachtung:**

Zunächst liegen am Ausgang etwa  $U_a = 2,2V$  an. Nimmt der Transistor beim Hochfahren des Rechteckgenerators seinen Betrieb auf, so steigt  $U_a$  auf  $4V$ . Entfernt man den Lastwiderstand, so schnellt die Ausgangsspannung bis auf etwa  $U_a = 15V$  hoch. Baut man den Widerstand wieder ein, so geht sie wieder auf  $U_a = 4V$  zurück. Mit dem Kondensator  $C_a$  am Ausgang zeigt der Oszilloscograph eine perfekte Gleichspannung an, ohne Kondensator eine stark schwankende Gleichspannung zwischen  $9V$  und  $2,2V$  während der Ausschaltphase des Transistors und  $0V$  in der Einschaltphase. Bei  $f = 25kHz$  schwankt die Spannung weit weniger. Ist der Transistor ausgeschaltet, so schnellt sie zunächst nur auf  $U_a = 5V$  hoch und fällt dann auf  $3,9V$  ab, ist er eingeschaltet, so ist  $U_a$  nach wie vor  $0V$ . Der Wert mit Kondensator bleibt bei konstanten  $4V$ . Die genauen Spannungsverläufe entnehmen Sie den Graphiken in Abb.1g und Abb.1h. Die roten Linien geben den Verlauf ohne Kondensator wieder, die blauen Linien mit Glättungskondensator.

**Ergebnis:**

Im normalen Betrieb misst man folgende Werte:

$$U_e = 2,5V$$
$$I_e = 7,2mA$$
$$U_a = 4V$$
$$I_a = 4mA.$$



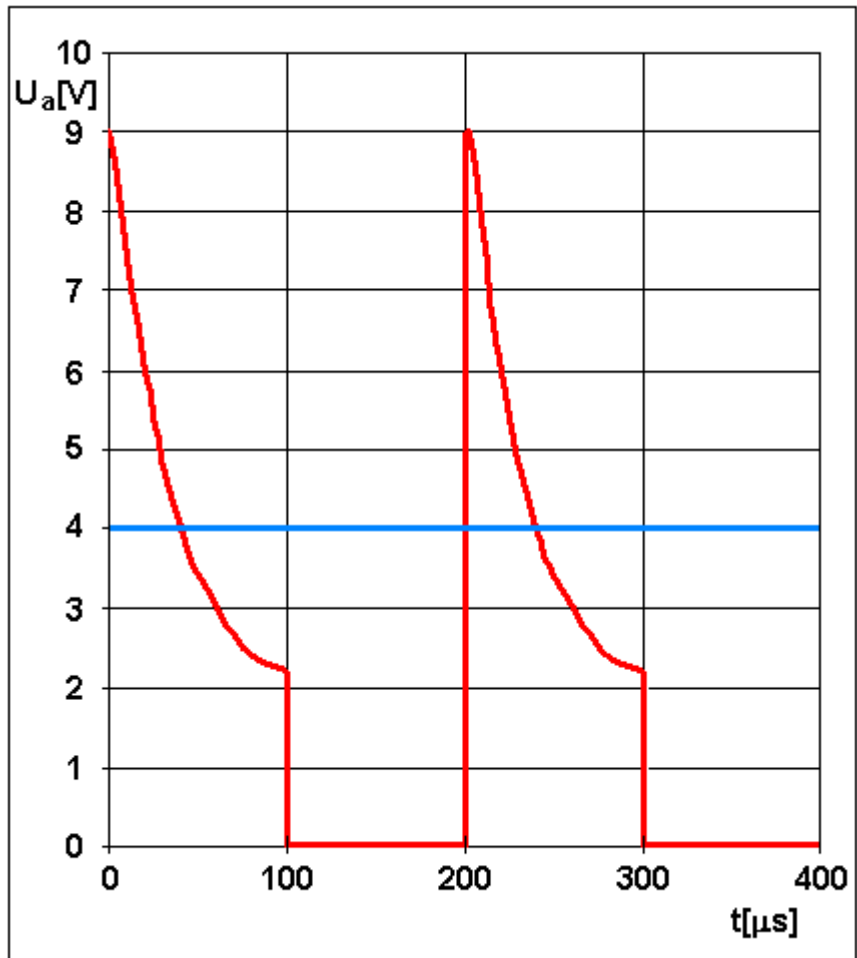


Abb.1g: Aufwärtsregler  $f = 5\text{kHz}$

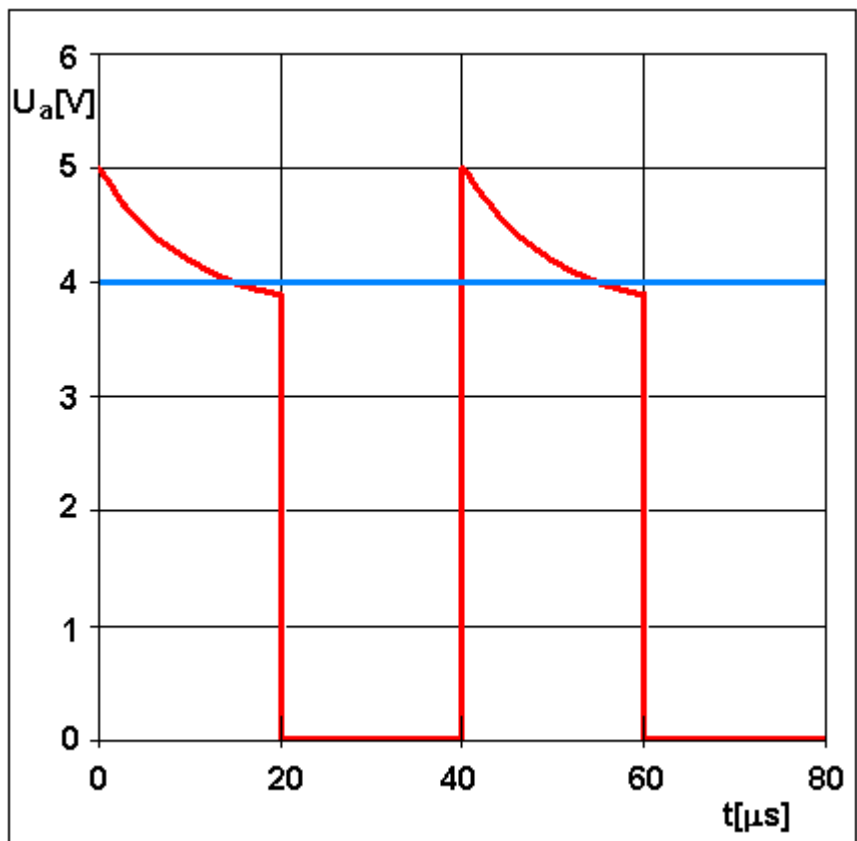


Abb.1h: Aufwärtsregler  $f = 25\text{kHz}$

**Auswertung:**

Damit erhält man für die Leistungen:

$$\begin{aligned} P_e &= U_e \cdot I_e \\ &= 2,5V \cdot 7,2mA \\ &= 18mW \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_a &= U_a \cdot I_a \\ &= 4V \cdot 4mA \\ &= 16mW \end{aligned}$$

und für den Wirkungsgrad  $\eta$

$$\begin{aligned} \eta &= P_a \cdot 100\% / P_e \\ &= 89\%. \end{aligned}$$

Die Oszillographenbilder in Abb.1g und 1h bestätigen die obigen Überlegungen zur Funktion des Auf- bzw. Abwärtsreglers.

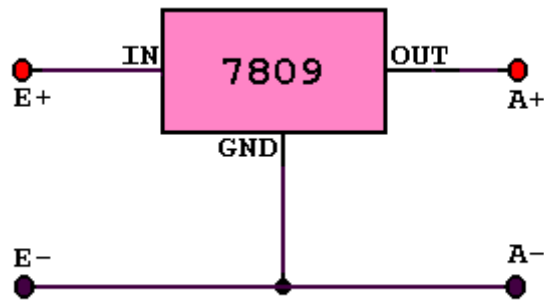
Steuert man das Abtastverhältnis des Rechteckgenerators mit einem kleinen Teil der Spulenspannung über einen Rückkopplungswiderstand oder einen Spannungsteiler, dann regelt sich die Schaltung auf den eingestellten Strom oder die eingestellte Spannung ständig selbst nach. Das gilt auch, wenn sich die Betriebsspannung ändert, weil z.B. die Batterie leerer wird. Die Einschaltphase verlängert sich, die Ausschaltphase verkürzt sich. Der Eingangsstrom fließt länger. Die mittlere Eingangsstromstärke steigt, so dass die übertragene Energieportion gleich bleibt. Führt man den Rückkopplungswiderstand als Potentiometer aus, so kann man die Schaltung dimmen. Durch die hohe Schaltfrequenz der Konverter kommt die Speicherdrossel außerdem ohne Eisenkern aus. Sie kann sehr klein ausgelegt sein. Die Verluste im Eisenkern aufgrund von Wirbelströmen entfallen. Außerdem passt die Schaltung in ein kleines Gehäuse, z.B. in den Schraubsockel einer herkömmlichen Glühbirne. Die Speicherdrossel kann auch als Überträger ausgelegt sein, so dass ihre Energie auf einen zweiten, galvanisch getrennten Kreis übertragen werden kann. Das ist vor allem bei Netzbetrieb aus Sicherheitsgründen wichtig. Gleichzeitig kann durch den Überträger über das Windungsverhältnis der beiden Spulen die Ausgangsspannung eingestellt werden.

## 3.2 Konkrete Regler

### 3.2.1 Schaltregler 7809

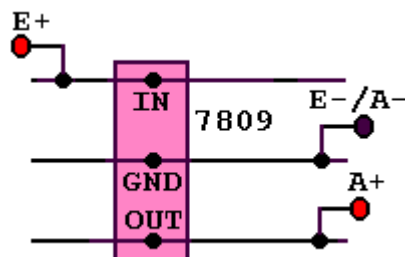
Inzwischen gibt es Schaltregler in Form integrierter Schaltungen, die den Oszillator, den Treibertransistor und diverse Zusatzfunktionen wie Energiesparmodus bei geringer Belastung und Ein- und Ausschaltautomatik bei Überlastung, Kurzschluss oder Überhitzung in einem Gehäuse vereinigen. Die neueste Entwicklung sind pinkompatible Schaltregler zu den Spannungsreglern der Serie 78xx. Sie benötigen keinen Kondensator am Ein- bzw.

Ausgang und haben über einen weiten Eingangsspannungsbereich einen hohen Wirkungsgrad zwischen 70% und 96%. Sie sind zur Zeit jedoch noch sehr viel teurer als die entsprechenden Spannungsregler. Aber das wird sich mit Sicherheit noch ändern. Abb.1 zeigt die Pinbelegung eines solchen Regler für 9V Ausgangsspannung.



**Abb.1: Schaltregler 7809**

Da er keine zusätzlichen Bauteile erfordert, kann man ihn ohne besonderen Aufwand auf einer Lochrasterplatine verlöten (s. Abb.2), die man anschließend auf zwei Holzleisten schraubt. Sie klebt man auf den Boden einer Ferrero-Rocher oder Mon-Cherri-Dose.



**Abb.2: Verschaltung auf einer Lochrasterplatine**

Im Deckel befestigt man drei Buchsen, eine schwarze für den gemeinsamen Minuspol und zwei rote für den Pluspol der Eingangsspannung bzw. Ausgangsspannung. Sie werden mit Schaltlitze mit den entsprechenden Anschlüssen auf der Platine verbunden. Mit der fertigen Schaltung führt man den folgenden Versuch durch.

**Versuch 1:**

**Aufbau:**

s. Kapitel 2.2

**Durchführung:**

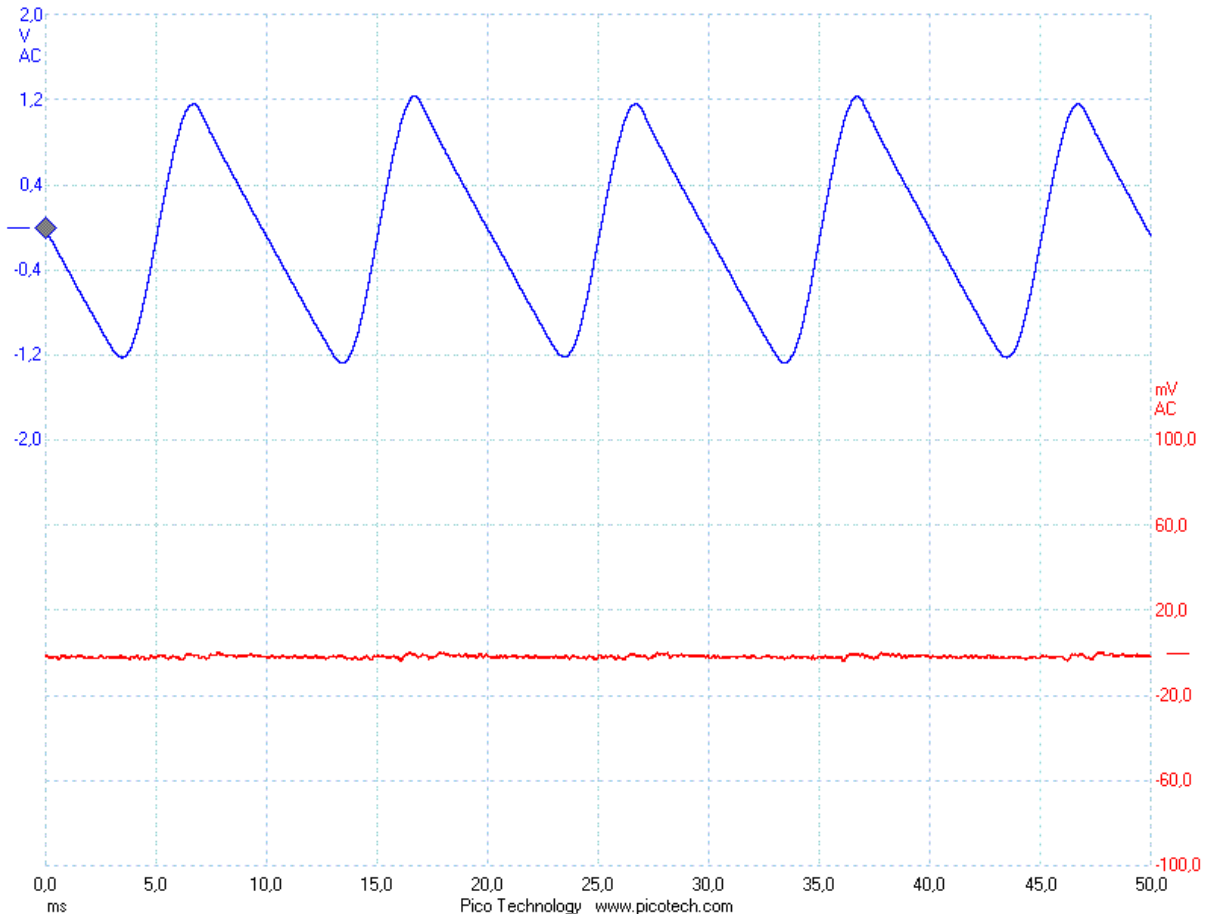
s. Kapitel 2.2

**Ergebnis:**

Man erhält folgende Messtabelle:

$I_e$ [A]	$U_e$ [V]	$I_a$ [A]	$U_a$ [V]	$P_e$ [W]	$P_a$ [W]	$\eta$ [%]
0,063	17,0	0,1	9,10	1,07	0,91	85,0
0,124	16,0	0,2	9,10	1,98	1,82	91,9
0,192	15,3	0,3	9,10	2,94	2,73	92,8
0,269	14,5	0,4	9,10	3,90	3,64	93,3
0,359	13,5	0,5	9,09	4,85	4,55	93,8
0,468	12,4	0,6	9,09	5,80	5,45	94,0

Das Picoscope zeichnet die Kurven in Abb.3 auf.



**Abb.3: Welligkeit des Eingangs- und Ausgangsspannung**

Aus der oberen Kurve liest man bei einem Ausgangsstrom von  $I_a = 0,3$  A eine Eingangswelligkeit  $\Delta U_e = 2,4$  V und aus der unteren Kurve eine Ausgangswelligkeit von  $\Delta U_a = 0$  mV ab. Sie steigt am Eingang auf  $\Delta U_e = 4,5$  V und bleibt am Ausgang bei  $\Delta U_a = 0$  mV, wenn man den Ausgangsstrom auf  $I_a = 0,5$  A erhöht.

**Folgerung:**

Die Ausgangsspannung bleibt sehr gut konstant. Immerhin sinkt sie bis über die Belastungsgrenze des Netzteiles von 0,5A nur um

$$P_a = (9,10V - 9,09V) * 100\% / 9,10V = 0,11\%$$

während die Eingangsspannung um

$$P_e = (17,0V - 12,4V) * 100\% / 17,0V \\ = 27,1\%$$

gefallen ist. Und dabei scheint der Regler keine Welligkeit am Ausgang zu besitzen, obwohl die Eingangsspannung sehr viel stärker schwankt als beim vergleichbaren Versuch mit dem Spannungsregler 7809 aus Kapitel 2.4.1. Am Eingang liegt nur der Kondensator des Netzteiles von 470  $\mu$ F an, während beim Spannungsregler ein zusätzlicher Kondensator von 1000  $\mu$ F parallel zum Eingang eingelötet wurde. Dieser Eindruck täuscht. Streckt man die Zeitachse des Picoscopes in den  $\mu$ s-Bereich, so stellt man eine Welligkeit von 15-20 mV mit einer Frequenz von  $f = 500$  kHz fest. Es handelt sich dabei um die Schaltfrequenz des Reglers, wie in Versuch 3 gezeigt wird. Der Wirkungsgrad ist im Schnitt um 25 - 30% höher als beim Spannungsregler und das fast unabhängig von der Differenz zwischen Eingangsspannung und Ausgangsspannung. Nur bei kleinen Ausgangsströmen fällt er deutlich ab. Der Schaltregler ist kein Linearregler, bei dem der Eingangsstrom geregelt direkt zum Ausgang fließt. In ihm wird vielmehr die Eingangsleistung auf den Ausgang übertragen. Das macht der folgende Versuch besonders deutlich.

## **Versuch 2:**

### **Aufbau:**

s. Kapitel 2.2

### **Durchführung:**

Man ersetzt das Netzteil durch eine regelbare Gleichspannungsquelle. Man stellt einen Ausgangsstrom von  $I_a = 0,3$  A ein und regelt die Eingangsspannung so weit herunter, bis die Ausgangsspannung gerade zu fallen beginnt. Man liest die Werte ab und erhöht dann die Eingangsspannung schrittweise bis auf  $U_e = 20V$ .

### **Ergebnis:**

Man erhält folgende Messtabellen:

$I_e$ [A]	$U_e$ [V]	$I_a$ [A]	$U_a$ [V]	$P_e$ [W]	$P_a$ [W]	$\eta$ [%]
0,274	10,4	0,3	9,10	2,85	2,73	95,6
0,232	12,5	0,3	9,10	2,90	2,73	94,1
0,195	15,0	0,3	9,10	2,93	2,73	93,2
0,170	17,5	0,3	9,10	2,98	2,73	91,6
0,151	20,0	0,3	9,10	3,02	2,73	90,4

**Messtabelle Schaltregler 7809**

### **Folgerung:**

Mit steigender Eingangsspannung sinkt der Eingangsstrom, so dass die Eingangsleistung nahezu konstant bleibt bei gleicher Belastung am Ausgang. Der Wirkungsgrad sinkt nur um wenige Prozent und erreicht sein Maximum, wenn die Eingangsspannung etwa 1,5V über der Ausgangsspannung liegt. Der Regler wird nicht warm, da er keine Überschussleistung abführen muss. Er

benötigt keinen Kühlkörper, ist allerdings 20 mal teurer als die vergleichbaren Spannungsregler. Aber das wird sich mit Sicherheit in Zukunft noch ändern, da dieser Schaltregler erst seit kurzem auf dem Markt ist.

### **Versuch 3:**

#### **Aufbau:**

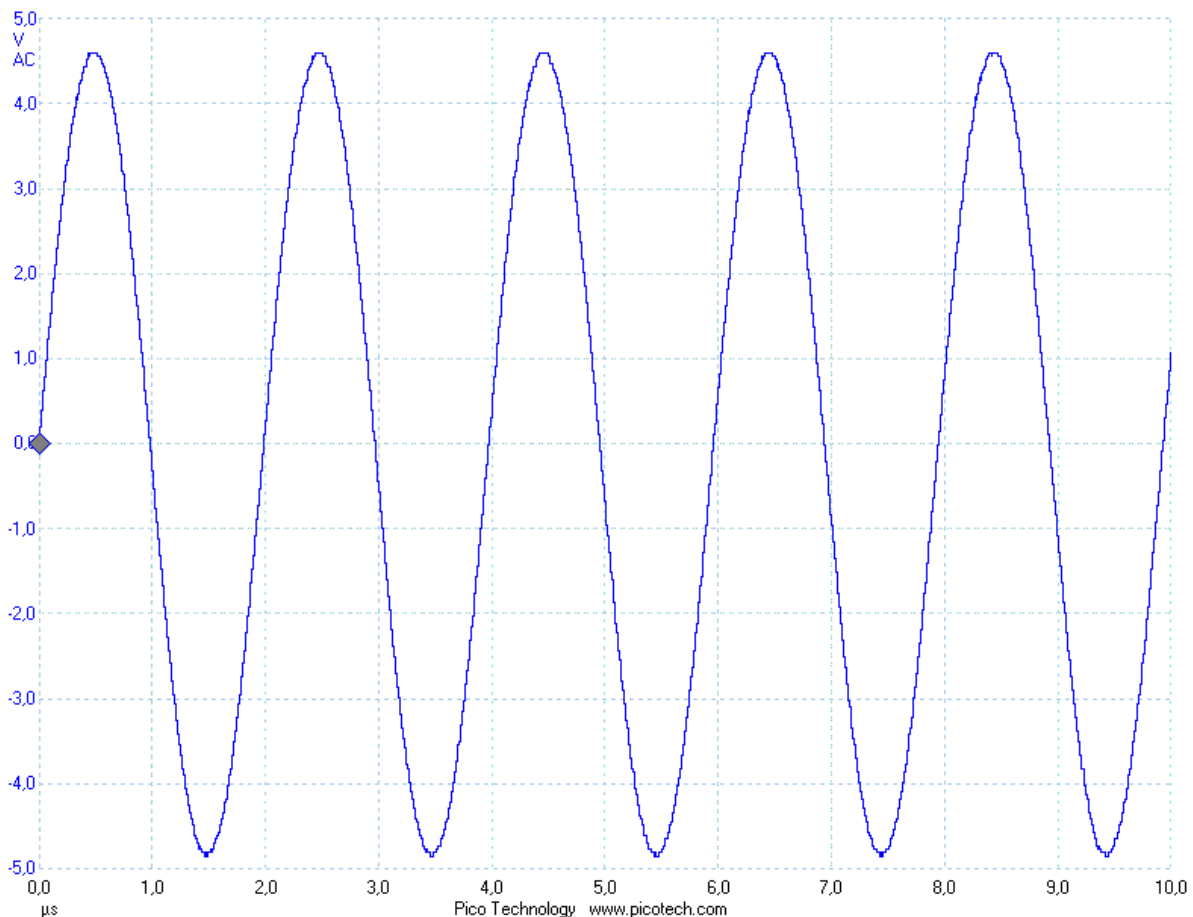
Da die Schaltfrequenz am Rande des MW-Radiobereiches liegt, baut man einen Schwingkreis aus der MW-Spule mit 75 Windungen von Phywe und einem Drehkondensator mit  $C = 500 \text{ pF}$  auf. An den Schwingkreis schließt man das Picoscope an.

#### **Durchführung:**

Die Spule legt man auf das Gehäuse des Schaltreglers und stellt mit dem Kondensator den Schwingkreis auf Resonanz ein. Man zeichnet die Kurve mit dem Picoscope auf. Anschließend misst man mit einem LCR-Meter die eingestellte Kapazität des Kondensators und die Induktivität der Spule.

#### **Beobachtung:**

Abb. 4 zeigt die Kurve des Picoscopes.



**Abb.4: Schaltsignal des Schaltreglers 7809**

Man erhält außerdem eine Kapazität  $C = 305 \text{ pF}$  und eine Induktivität  $L = 326 \text{ µH}$ .

#### **Auswertung:**

Aus der Kurve liest man eine Periodendauer von ungefähr  $T = 2 \text{ µs}$  ab. Um einen genaueren Wert zu erhalten, berechnet man sie mit

der Thomsonformel aus der Induktivität und der Kapazität. Es ergibt sich

$$\begin{aligned}
 T &= 2\pi \cdot \text{sqr}(L \cdot C) \\
 &= 2\pi \cdot \text{sqr}(3,05 \cdot 10^{-10} \text{F} \cdot 3,29 \cdot 10^{-4} \text{H}) \\
 &= 1,98 \text{ } \mu\text{s}.
 \end{aligned}$$

Damit beträgt die Schaltfrequenz wie vermutet

$$f = 505 \text{ kHz.}$$

Laut Datenblatt des Herstellers<sup>3)</sup> liegt sie zwischen 400 kHz und 600 kHz.

### 3.2.2 LED-Konverter

Speziell zum Betrieb von Hochleistungs-LED's haben einige Hersteller Schaltregler entwickelt, die direkt an 230V Wechselspannung angeschlossen werden können. Sie vereinigen in einem Gehäuse den Schaltregler und das Netzgerät samt Gleichrichter. Einen solchen Schalttrafo auf der Basis des Schaltregler-IC's LNK501<sup>7)</sup> hat z.B. die Firma [Power Integrations](#) entwickelt. Er wird vielfach als Akkuladegerät für Handys, Digitalkameras, MP3-Player oder Rasierapparate benutzt. Von der Firma Barthelme wurde die Schaltung zum LED-Konverter weiterentwickelt. Er wird von [Conrad-Electronic](#) als fertig aufgebautes Gerät unter der Bezeichnung MPL1<sup>8)</sup> vertrieben. Laut Datenblatt des LNK501<sup>7)</sup> besitzt der Schaltregler, auf dem der Konverter beruht, den grundsätzlichen Aufbau nach Abb.1.

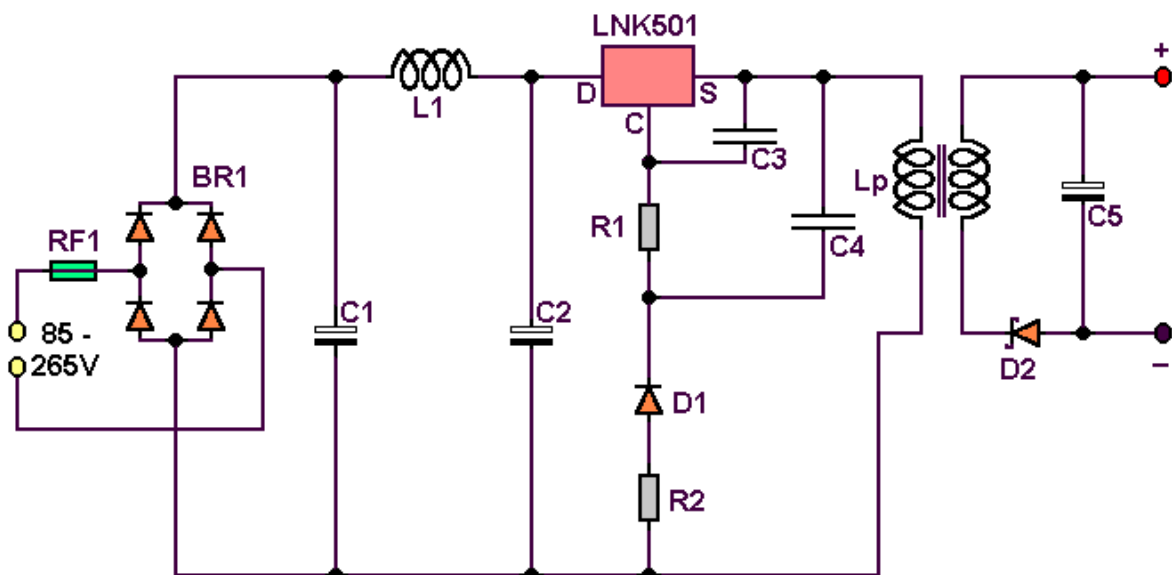
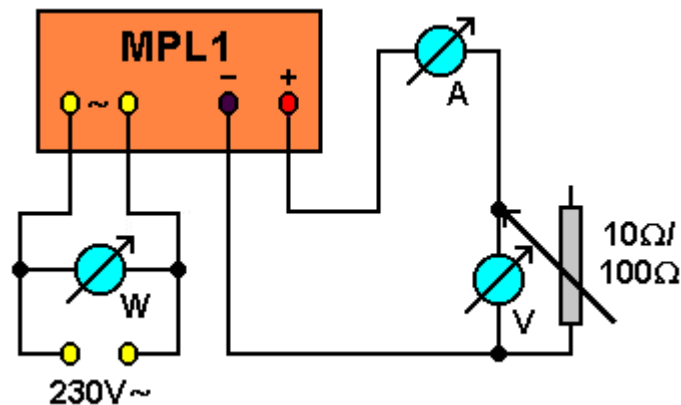


Abb.1: Schaltregler/Konverter

Zunächst wird die Netzspannung gleichgerichtet. Die Siebkette filtert hochfrequente Spannungsanteile heraus und verhindert so eine Rückwirkung der Schaltung auf das Stromnetz, wodurch

die Oberwelligkeit des sinusförmigen Netzstromes erhöht würde. Daher liegt die Spule  $L_1$ , die die Gleichspannungsanteile ungehindert passieren lässt, zwischen zwei Kondensatoren  $C_1$  und  $C_2$ , die die hohen Frequenzen auf beiden Seiten kurzschließen. Die Gleichspannung wird geglättet und vom Schaltregler-IC LNK501 zerhackt. Es arbeitet im Normalbetrieb mit einer Frequenz  $f = 42\text{kHz}$  und im Energiesparmodus mit  $f = 30\text{kHz}$ . Dies wird in Versuch 2 gezeigt. Wird der Regler mit der Betriebsspannung verbunden, so lädt sich der Kondensator  $C_3$  intern auf  $5,6\text{ V}$  auf. Er aktiviert den Oszillator und das IC nimmt seine Arbeit auf. Energie wird portionsweise zur Speicherdrossel  $L_p$  transportiert, die als Überträger ausgelegt ist. Ein kleiner Teil der in der Primärwicklung gespeicherten Energie treibt den Rückkopplungsweig an, der aus  $R_2$ ,  $D_1$ ,  $R_1$  und  $C_3$  gebildet wird.  $R_2$  begrenzt die Stromspitzen, die beim Schalten von Induktivitäten auftreten können, auf ein ungefährliches Maß.  $D_1$  hält den Stromfluss durch die Spule während der Ausschaltzeiten des Oszillators aufrecht. An  $C_4$  baut sich eine Spannung auf, die den für die Rückkopplung benötigten Strom durch den Rückkopplungswiderstand  $R_1$  liefert und so das IC steuert.  $C_3$  hält diesen Strom während der Einschaltzeiten des Oszillators aufrecht, in denen der Rückkopplungskreis stromlos ist, da die Diode  $D_1$  sperrt. Steigt die Spannung im Primärkreis des Transformators, so nimmt der Rückkopplungsstrom ebenfalls zu. Über seine Größe werden die Zusatzfunktionen der Schaltung gesteuert. Welche Vorgänge dabei im Einzelnen ablaufen, lässt sich am besten anhand der U/I-Kennlinie des Konverters erklären. Sie kann man mit der Schaltung nach Abb. 2 aufnehmen.



**Abb.2: Versuchsaufbau U/I-Kennlinie des LED-Konverters**

### **Versuch 1:**

#### **Durchführung:**

Man baut die Schaltung nach Abb.2 auf. Zunächst startet man mit voll aufgedrehtem  $100\Omega$ -Poti. Der Widerstand wird dann schrittweise reduziert. Für jeden Stopp notiert man sich die Spannung, die Stromstärke und die Leistung in einer U/I/P-Tabelle. Dann ersetzt man das  $100\Omega$ -Poti durch ein  $10\Omega$ -Poti und



führt die Reihe bis  $0\Omega$  fort. Aus der Tabelle erstellt man mit Excel die U/I-Kennlinie.

**Beobachtung:**

Zunächst fällt die Ausgangsspannung U nur langsam ab, der Ausgangstrom I steigt kontinuierlich. Erreicht er seinen Maximalwert, so behält er seinen Wert bei. Dafür sinkt die Ausgangsspannung fast gleichmäßig. Ab einer gewissen Spannung fällt der Strom sehr schnell auf 50 mA ab. Die genauen Werte entnehmen Sie Tabelle 1. Trägt man U gegen I auf, so erhält man den Kurvenverlauf in Abb. 3.

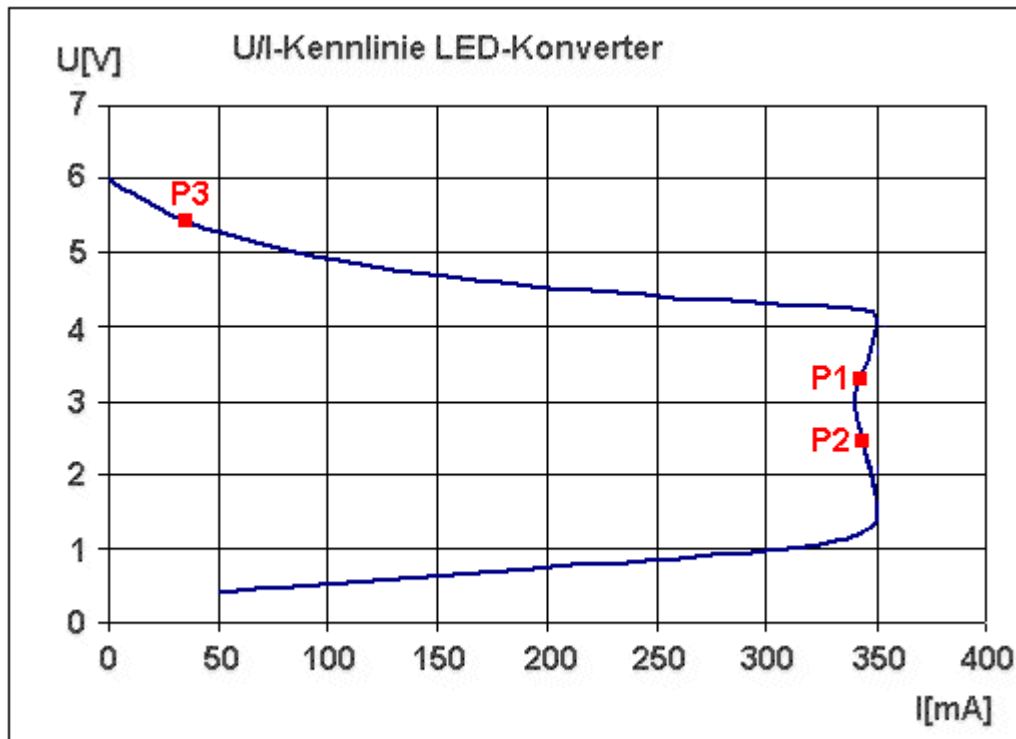
U [V]	I [mA]	P <sub>E</sub> [W]	P <sub>A</sub> [W]	η [%]
6	0	0	0	-
5,9	6	0,06	0,035	58,3
5,5	30	0,26	0,165	63,5
5,2	60	0,49	0,312	63,7
4,9	100	0,75	0,490	65,3
4,7	150	1,09	0,705	64,7
4,5	200	1,40	0,900	64,3
4,3	290	1,90	1,247	65,6
4,2	350	2,15	1,470	68,4
3,7	350	1,97	1,295	65,7
3,4	345	1,74	1,173	67,4
3,0	340	1,57	1,020	65,0
2,5	345	1,34	0,863	64,4
2,0	350	1,02	0,700	68,6
1,3	350	0,67	0,455	67,9
1,0	310	0,47	0,310	66,0
0,4	50	0,03	0,020	66,7

**Tabelle 1: Messwerte**

**Erklärung:** <sup>7)</sup>

Ist die Ausgangsleistung P<sub>A</sub> wie zu Beginn des Versuches sehr klein, so startet der Regler im Energiesparmodus mit einer Schaltfrequenz von 30 kHz. Der Steuerstrom liegt dann in der Größenordnung von I<sub>C</sub> = 2,4 mA, der Ausgangstrom bei I<sub>A</sub> = 10 mA. I<sub>C</sub> ist recht groß, da die Spannung im Sekundärkreis und damit im Primärkreis ihren Höchstwert erreicht. Nimmt die Ausgangsleistung zu, so geht der Regler bei einem Steuerstrom von I<sub>C</sub> = 2,3mA und etwa 4% seiner Maximalleistung in den Normalmodus über, in dem die Schaltfrequenz auf 42 kHz erhöht wird. Die zusätzlich benötigte Energie des Verbrauchers wird durch einen zunehmenden Strom aufgebracht, die Spannung sinkt nur wenig. Der Schaltregler arbeitet im Konstantspannungsbereich. Erreicht der Strom seine Obergrenze, so schaltet der Regler auf den Konstantstrommodus um. Das geschieht bei einem Steuerstrom von etwa 2mA. Reduziert man den Lastwiderstand weiter, so sinken die Ausgangsspannung und der Steuerstrom ab. Erreicht er I<sub>C</sub> = 1mA, so schaltet der Regler ab und aktiviert die Einschaltautomatik. So ist die Schaltung vor Überlastung, möglicher-

weise auch verursacht durch einen Kurzschluss, geschützt. Die Einschaltautomatik versucht in diesem Zustand 300 mal pro Sekunde, den Regler wieder im Normalmodus zu starten. Das gelingt, sobald die Überlastung beseitigt wurde.



**Abb.3: U/I-Kennlinie des LED-Konverters**

Vor allem der Konstantstrommodus ist für den LED-Betrieb bestens geeignet. Eine weiße LED mit einer Leistung von 1W besitzt laut Hersteller folgende Kenndaten:

$$U = 3,2 \text{ V}$$

$$I = 350 \text{ mA.}$$

Aus der U/I-Kennlinie in Abb.3 kann man entnehmen, dass der Schaltregler diese Werte im Punkt P1 an seinem Ausgang fast optimal liefern kann. Für eine rote Hochleistungs-LED der Leistung 1W gilt laut Hersteller:

$$U = 2,5 \text{ V}$$

$$I = 350 \text{ mA}$$

In Punkt P2 der Kennlinie werden diese Werte in fast idealer Weise erreicht. Schließt man zwei weiße LED's in Reihe, was laut Hersteller möglich ist, so sinkt die Helligkeit beider LED's drastisch ab. Sie werden nur noch mit einem kleinen Teil ihrer vollen Leistung betrieben. Nachmessen lieferte für die Spannung und die Stromstärke:

$$U = 5,4 \text{ V}$$

$$I = 35 \text{ mA,}$$

wobei für den optimalen Betrieb folgende Werte erforderlich gewesen wären:

$$\begin{aligned}U &= 2 \cdot 3,2\text{V} \\ &= 6,4\text{V} \\ I &= 350\text{A}.\end{aligned}$$

Diese Werte kann der Schaltregler an seinem Ausgang nicht liefern. Vor allem die hohe benötigte Spannung bereitet ihm Probleme, die er näherungsweise nur in Punkt P3 der Abb. 3 bei einem Strom zur Verfügung stellen kann, der die LED's gerade noch zum Leuchten bringt. Laut Hersteller soll man an den Konverter nicht zwei rote LED's in Reihe gleichzeitig anschließen. Warum das so ist, geht aus der Bedienungsanleitung nicht hervor. Möglicherweise befindet sich der Konverter dann in der Nähe des Übergangsbereiches zwischen konstanter Spannung und konstanter Stromstärke. Da LED's erhebliche Toleranzen aufweisen, könnten die LED's sich in einem nicht vorhersagbaren Zustand befinden, so dass sie entweder zu hell oder nur wenig leuchten.

Den elektrischen Wirkungsgrad der Schaltung ermittelt man, in dem man die Eingangsleistung  $P_E$  mit einem Wattmeter (s. Abb.2) bestimmt. Man misst bei maximaler Ausgangsbelastung  $P_A$  (s. Abb.3)

$$\begin{aligned}P_A &= 0,350\text{A} \cdot 4,2\text{V} \\ &= 1,47\text{W}\end{aligned}$$

des Konverters eine Eingangsleistung

$$P_E = 2,15\text{W}.$$

Damit erhält man einen Wirkungsgrad

$$\begin{aligned}\eta &= P_A \cdot 100\% / P_E \\ &= 68,4\%.\end{aligned}$$

Für alle anderen Punkte der Kennlinie ergeben sich ähnliche Werte, wie Sie der Tabelle 1 entnehmen können. Laut Datenblatt des LNK501<sup>7)</sup> besitzt die Schaltung einen Wirkungsgrad von ca. 72%, was mit dem gemessenen Wert recht gut übereinstimmt. Der für Schaltregler relativ geringe Wirkungsgrad ist vor allem auf die für den Betrieb der LED's viel zu hohe Eingangsspannung zurück zu führen. Das macht einen Überträger erforderlich, der den Wirkungsgrad erheblich senkt.

## **Versuch 2:**

### **Aufbau:**

Man baut einen Schwingkreis aus der großen Phywe-Spule mit 1000 Windungen und einem Drehkondensator mit  $C = 500 \text{ pF}$  auf.

An den Schwingkreis schließt man das Picoscope oder einen Oszillographen an.

**Durchführung:**

Die Spule legt man auf das Gehäuse des Schaltreglers und regelt mit dem Kondensator den Schwingkreis auf Resonanz ein. Man liest am Picoscope die Periodendauer T ab.

**Beobachtung:**

Man erhält eine Periodendauer  $T = 24 \mu\text{s}$ .

**Ergebnis:**

Aus der Periodendauer errechnet man die Frequenz f zu

$$\begin{aligned} f &= 1/T \\ &= 1/2,4 \cdot 10^{-5} \text{ s} \\ &= 41,7 \text{ kHz,} \end{aligned}$$

in guter Übereinstimmung mit den Angaben des Herstellers.

Andere Firmen haben LED-Konverter auf der Basis von Schaltreglern entwickelt, mit denen sich bis zu 16 LED's in zwei getrennten Kreisen gleichzeitig bei voller Leistung von 1W pro LED betreiben lassen. Ein solcher dimmbarer Konverter der Firma Voltcraft mit der Bezeichnung Plus V12x350 besitzt bei einer Eingangsleistung pro Kreis von

$$P_E = 12,1\text{W}$$

und einer Ausgangsleistung pro Kreis von

$$\begin{aligned} P_A &= 0,35\text{A} \cdot 27\text{V} \\ &= 9,45\text{W} \end{aligned}$$

einen Wirkungsgrad von

$$\begin{aligned} \eta &= 9,45\text{W} \cdot 100\% / 12,1\text{W} \\ &= 78\%. \end{aligned}$$

Er ist ebenfalls für Netzbetrieb ausgelegt.

Andere integrierte Schaltungen sind für niedrigere Eingangsspannungen konzipiert. Dadurch steigt der Wirkungsgrad. Die Firma [recom-international](http://www.recom-international.com) verkauft z.B. den LED-Treiber RCD-24-0.35. Alle Bauteile inklusive Diode, Spule und Glättungskondensator sind in einem Gehäuse untergebracht. Mit nur einem externen Widerstand und einem Poti kann man bis zu sieben LED's zu je 1W Leistung gleichzeitig betreiben und dimmen. Die Betriebsspannung sollte an die Zahl der LED's angepasst werden, um die Verluste möglichst gering zu halten. Man benötigt 3,5 V pro LED. Dann erreicht man einen Wirkungsgrad bis 97%. Der Widerstand und das Poti müssen so für die Betriebsspannung ausgelegt werden, dass am Dimmereingang eine Spannung zwischen 0 V und 4,5 V anliegt. Dann werden die LED's von dun-

kel bis hell durchgesteuert. Weitere Informationen entnehmen Sie dem Datenblatt.<sup>6)</sup>

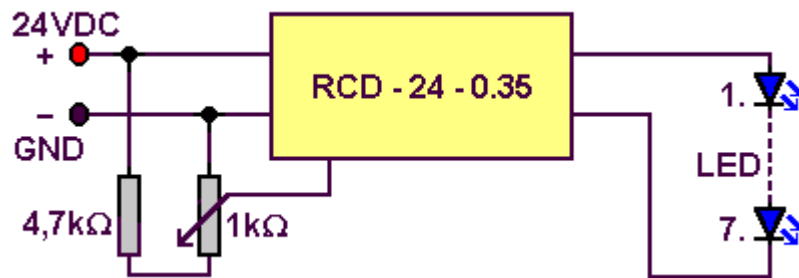


Abb.4: LED-Konverter RCD-24-0.35

### 3.2.3 LED-Taschenlampe

In LED-Taschenlampen werden Aufwärtsregler eingesetzt, damit die Helligkeit der LED konstant bleibt, wenn der Ladezustand des Akkus sinkt. Fällt die Spannung unter einen Grenzwert, so erlischt die LED fast schlagartig. Beim Aufwärtsregler **LT 1073** der Firma Linear Technology benötigt man als externe Bauteile eine Speicherdrossel, einen Glättungskondensator, eine Diode und 3 Widerstände, um den Strom zu begrenzen und die Rückkopplungsspannung zu gewinnen. Abb.1 zeigt eine typische Anwendung der Schaltung. Mit ihr lässt sich eine weiße LED mit einer Mignonzelle mit 1V - 1,5 V betreiben. Die integrierte Schaltung bietet weitere interessante Möglichkeiten. Man kann Spannungen bis zu 12 V aus einer 5 V Batterie erzeugen. Sie kann auch als Abwärtsregler benutzt werden. Nähere Informationen entnehmen Sie dem Datenblatt.<sup>5)</sup> Wegen der integrierten Bauweise sind die Schaltwege kurz. Die Verluste werden geringer, der Wirkungsgrad steigt laut Hersteller bis auf 97%.

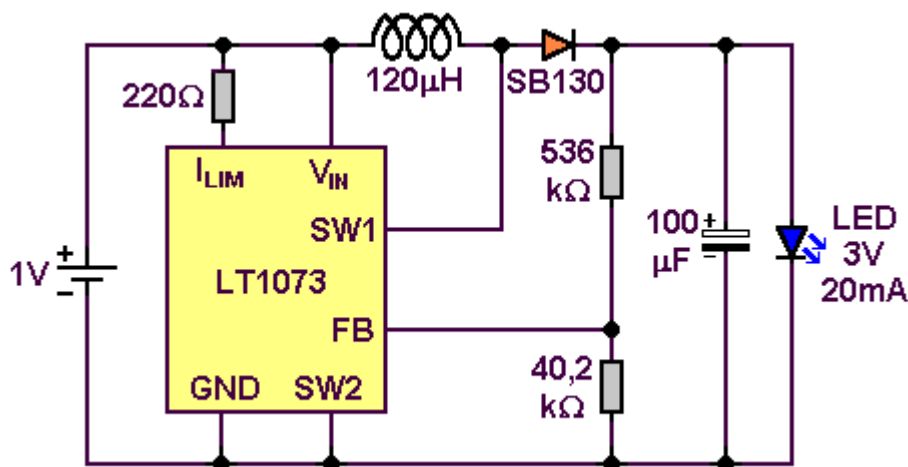
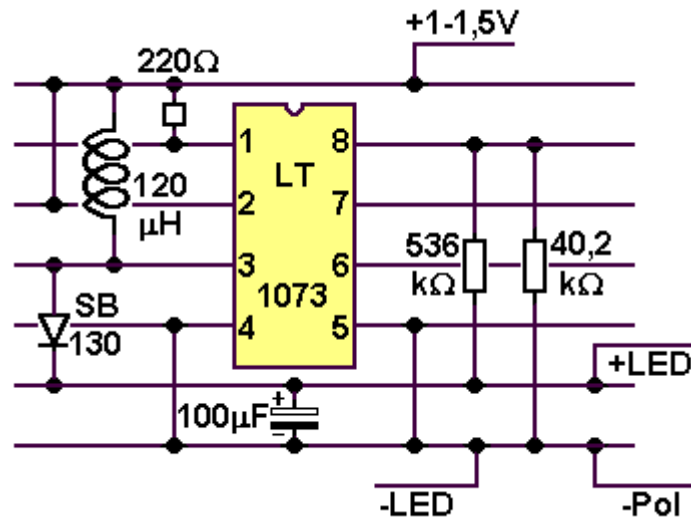


Abb.1: Aufwärtsregler LT1073

Die Verschaltung auf einer Lochrasterplatine zeigt Abb.2.



**Abb.2: Verschaltung auf einer Lochrasterplatine**

Für ein Modell der Taschenlampe benötigt man außer der Platine noch folgende Teile:

- 1 Mikroschalter
- 1 Batteriehalter für eine Mignonbatterie AA
- 1 Mignonbatterie AA
- 1 LED-Fassung
- 1 weiße LED
- 2 Holzschraubchen
- 2 Holzleisten 10x10x40mm
- 1 Ferrero-Rocher-Dose
- Lötmaterial
- Patex

Zunächst befestigt man die fertig verlötete Platine mit den Schraubchen auf den Holzleisten. Dann klebt man die Leisten ebenso wie den Batteriehalter mit etwas Patex auf den Boden der Ferrero-Rocher-Dose. Für die LED-Fassung bohrt man mit einem Holzbohrer ein 8 mm-Loch in den Deckel der Dose, für den Mikroschalter ein 6 mm-Loch und verschraubt die Teile am Deckel. Man setzt die LED ein und verbindet die einzelnen Teile mit Schlitze gemäß Abb. 1 und 2. Zwischen den Pluspol der Batterie und den Pluspolanschluss der Platine legt man den Mikroschalter, damit man die LED ein- und ausschalten kann. Fertig ist die Luxusausführung der Taschenlampe. Sie ist wegen der vielen Bauteile allerdings nicht ganz billig. Dafür leuchtet sie bis zum Schluss mit stets gleicher Helligkeit und die Batterie hält sehr lange.

#### **4. Literaturverzeichnis**

- 1) Basiswissen Spannungsregler, Hrsgb. Conrad-Electronic Hirschau, Bestell-Nr. 177750
- 2) Bedienungsanleitung Netzteil LM 317, Hrsgb. Conrad-Electronic Hirschau, Bestell-Nr. 130312
- 3) Datenblatt W 78-xxx Bezugsquelle: [www.conrad.de/produktinfo](http://www.conrad.de/produktinfo)  
Artikelnummer: 167809
- 4) Datenblatt LD 1117, Bezugsquelle: [www.conrad.de/produktinfo](http://www.conrad.de/produktinfo)  
Artikelnummer: 147010
- 5) Datenblatt LT1073, Bezugsquelle: [www.conrad.de/produktinfo](http://www.conrad.de/produktinfo)  
Artikelnummer: 151773
- 6) Datenblatt RCD-24-0.35, Bezugsquelle:  
[www.conrad.de/produktinfo](http://www.conrad.de/produktinfo) Artikelnummer: 180321.
- 7) Datenblatt LNK 501, Bezugsquelle: [www.powerint.com](http://www.powerint.com)
- 8) Datenblatt MPL1, Bezugsquelle: [www.conrad.de/produktinfo](http://www.conrad.de/produktinfo)  
Artikelnummer: 175947