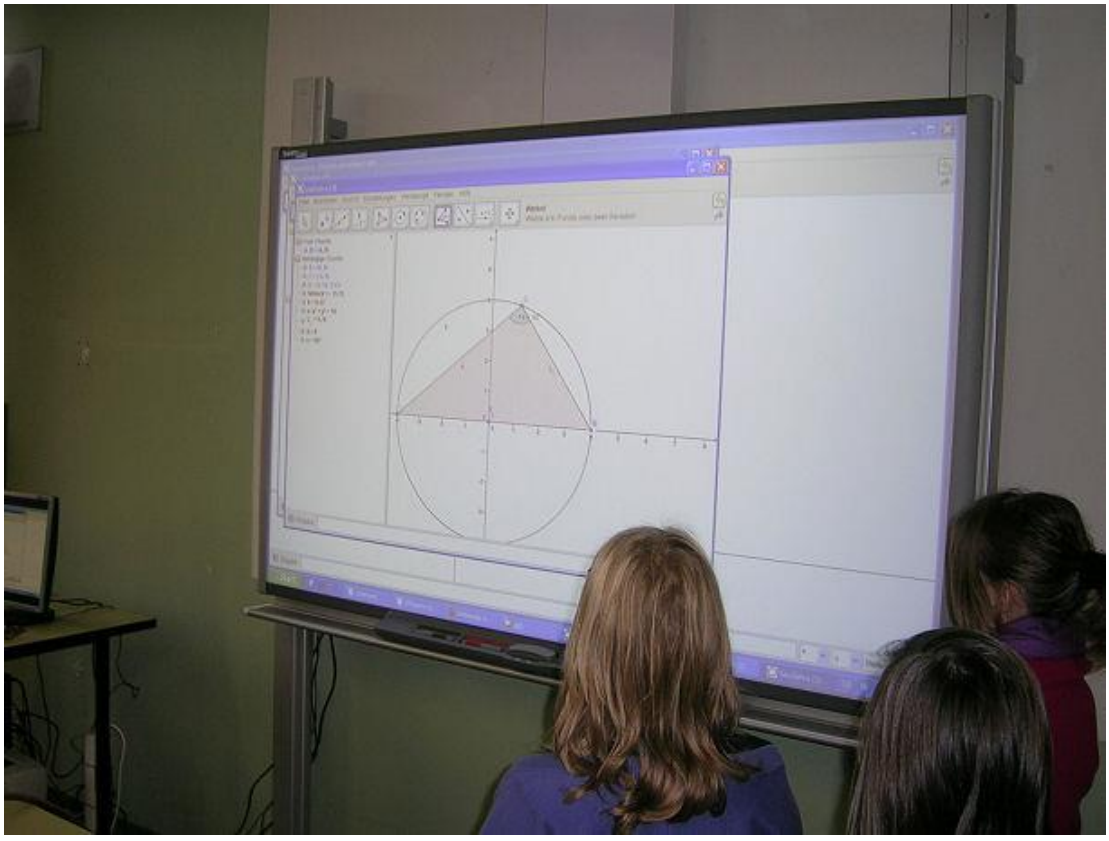
Spannungsregler
Schaltregler

Alfons Reichert



1.Einleitung 3
2. Spannungsregler 4
2.1 Grundlagen 4
2.2 Diskrete Bauteile 6
2.3 Operationsverstärker 9
2.4 Komplettregler 13
2.4.1 Reihe 78xx 13
2.4.2 Regler LM 317 15
2.4.3 Regler LD 1117V30 18
2.5 Verschiedenes 22
2.5.1 Grundlagen 22
2.5.2 Schaltungen 24
3. Schaltregler 26
3.1 Grundlagen 26
3.1.1 Theorie 26
3.1.2 Abwärtsregler 28
3.13 Aufwärtsregler 38
3.2 Konkrete Regler 48
3.2.1 Regler 7809 48
3.2.2 Regler MPL1 52
3.2.3 Regler LT1073 59
3.2.3 LED-Treiber 60
4. Literaturverzeichnis 66

1.Einleitung

Elektronische Geräte haben in den letzten Jahrzehnten fast alle Lebensbereiche erobert. MP3-Player, Smartphone, 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.

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 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. Da die LEDs in der Beleuchtungstechnik ihren Siegeszug angetreten haben, wird Gleichstrom immer mehr an Bedeutung gewinnen. In diesem Zusammenhang sei auch an die sich immer weiter verbreitende Photovoltaik zur Stromerzeugung erinnert. Gerade LEDs benötigen konstante Gleichspannungen, da sie auf Spannungsschwankungen wegen der sehr steilen U/I-Kennlinie empfindlich reagieren. Herkömmliche Spannungsregler haben einen schlechten Wirkungsgrad, vor allem dann, wenn die Eingangsspannung nicht richtig dimensioniert wird. Daher wurden für LEDs spezielle Schaltregler entwickelt. Ansonsten würde die wesentlich bessere Lichtausbeute der LEDs durch die schlechte Energienutzung der Treiber zum Teil zunichte gemacht. Auch Netzgeräte auf der Basis von Schaltreglern sind immer mehr auf dem Vormarsch, z.B. in Ladegeräten für Handys, Digitalkameras usw., vor allem auch deshalb, weil sie mit sehr unterschiedlichen Eingangsspannungen von 100 – 230 V Wechselspannung betrieben werden können. Netzadapter für Länder mit anderen Netzspannungen sind nicht mehr nötig. 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 und im März 2021

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 – 3 V 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. 1 V 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.

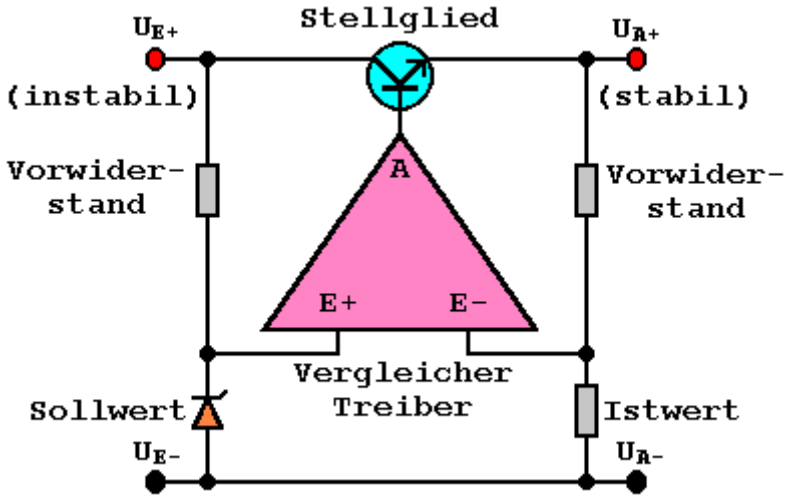


Abb.1: Aufbau eines Reglers

Aus der unstabilen 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 vergleichen und über das Stellglied notfalls nachgeregelt. 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. Die Netzspannung von 230V wird herunter transformiert auf z.B. U = 12 V 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.

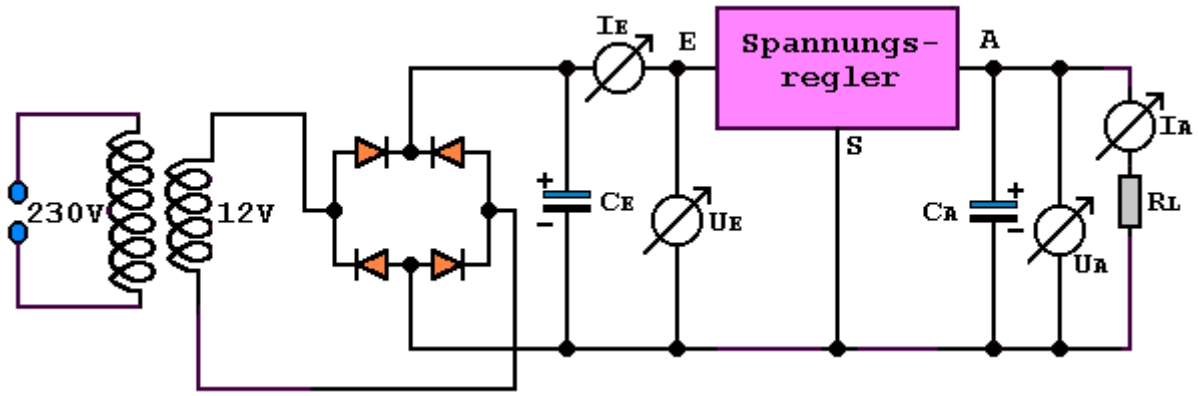


Abb.2: Einbau des Reglers in ein Netzgerät

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 η eines Reglers gilt gemäß Definition:

$$\eta = \frac{P_a}{P_e} * 100\% = \frac{U_a * I_a}{U_e * I_e} * 100\%$$

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 einen Regelstrom im mA-Bereich auskommen, ist im normalen Betrieb

$$I_a \approx I_e$$

so dass folgt

$$\eta = \frac{U_a}{U_e} * 100\%.$$

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

$$\eta = \frac{U_a}{U_e + U_R} * 100\%.$$

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

$$\eta_1 = \frac{3\text{V}}{3\text{V} + 1{,}8\text{V}} * 100\% = 62{,}5\%.$$

bei U_a = 9 V dagegen

$$\eta_2 = \frac{9\text{V}}{9\text{V} + 1{,}8\text{V}} * 100\% = 83{,}3\%.$$

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 V benötigt, so steigen die Wirkungsgrade auf

$$\eta_1 = \frac{3V}{3V + 1{,}06V} * 100\% = 73{,}9\%.$$

$$\eta_2 = \frac{9V}{9V + 1{,}06V} * 100\% = 89{,}5\%.$$

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 über das Stellglied direkt zum Ausgang und verursacht in ihm einen Wärmeverlust. Er wird vom Regler so gesteuert, dass die Ausgangsspannung konstant bleibt, auch wenn die Last sich ändert. In Schaltreglern dagegen wird wie beim Transformator Energie aus einem Primärkreis in einen Sekundärkreis übertragen. Je nach Spannung im Primär- bzw. Sekundärkreis kann der Eingangsstrom kleiner als der Ausgangsstrom oder aber die Ausgangsspannung größer als die Eingangsspannung sein, was bei Spannungsreglern nicht möglich ist. Der Wirkungsgrad eines Schaltreglers kann wie beim Transformator theoretisch bis zu 100% betragen. In der Praxis liegt er darunter, ist aber höher als bei Spannungsreglern, vor allem dann, wenn bei letzteren die Eingangsspannung nicht richtig dimensioniert wurde. Außerdem kann bei Schaltreglern die Ausgangsspannung an den Verbraucher angepasst werden und das über einen weiten Bereich der Eingangsspannung. Man benötigt keinen Vorwiderstand, um die Spannung und den Strom auf den Verbraucher abzustimmen.

2.2 Diskrete Bauteile

Die Abb. 1 zeigt die konkrete Schaltung eines Positivreglers aus diskreten Bausteinen. 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 Schaltlitze mit den entsprechenden 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.

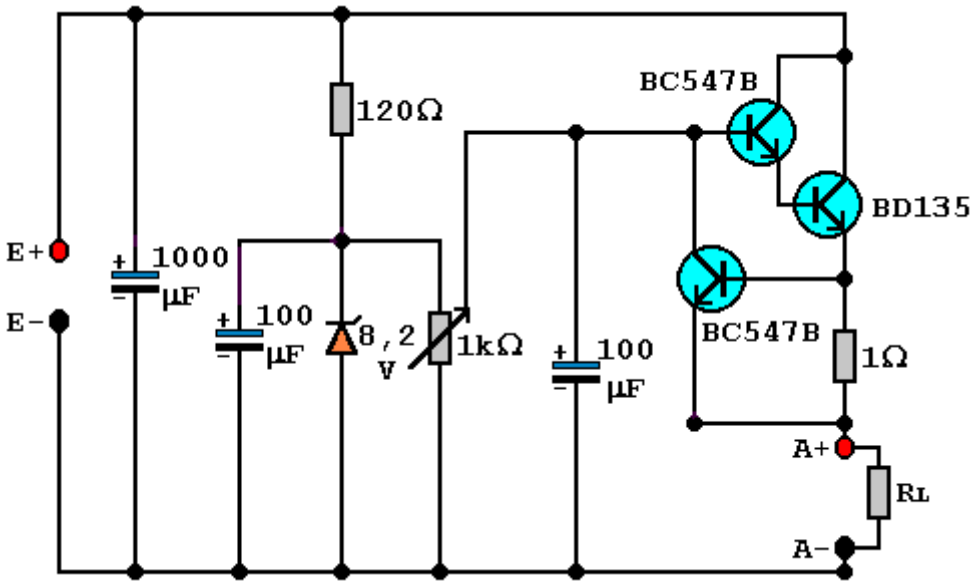


Abb.1: Regler aus diskreten Bauteilen

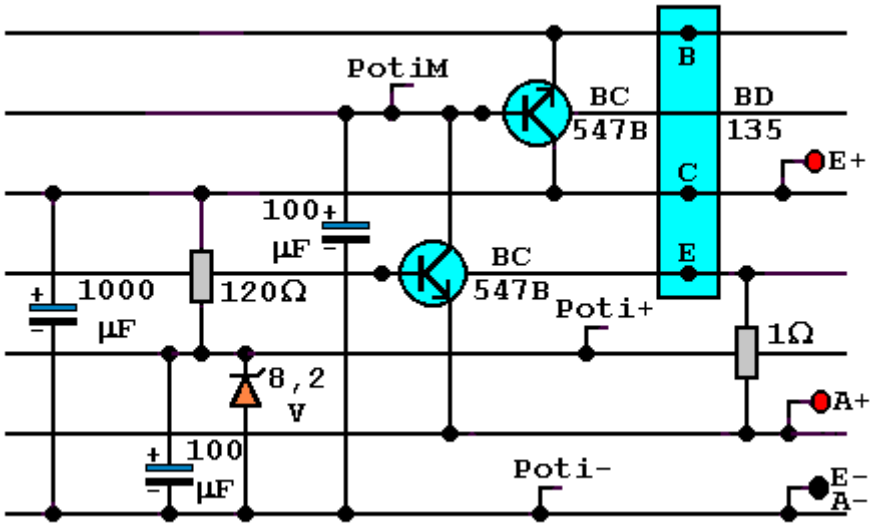


Abb.2: Verschaltung auf einer Lochrasterplatine

Versuch:

Aufbau:

Man schließt an den Eingang ein handelsübliches Netzteil mit U = 12 V und I = 500 mA an. An den Ausgang legt man ein Voltmeter, ein Amperemeter und ein Trimmpotentiometer 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 = 7 V. Mit zwei weiteren Volt- bzw. Amperemetern überwacht man den Eingangsstrom I_e und die Eingangsspannung U_e am Regler.

Durchführung:

Man stellt mit dem Potentiometer R_L verschiedene Ausgangströme I_a ein und zwar in Schritten von 0,1 A und liest die zugehörigen 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]	η[%]
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 mit folgender Formel berechnet:

$$\eta = \frac{P_a}{P_e} * 100\%.$$

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 ΔU_e = 1,4 V und aus der unteren Kurve eine Ausgangswelligkeit ΔU_a = 35 mV ab. Sie steigt am Eingang auf ΔU_e = 2,1 V und am Ausgang auf ΔU_a = 55 mV, wenn man den Ausgangsstrom auf I_a = 0,5 A erhöht.

Folgerung:

Die Ausgangsspannung bleibt nicht sonderlich gut konstant. Immerhin sinkt sie bis zur Belastungsgrenze des Netzteiles von 0,5 A nur um

$$Pr_a = \frac{(7{,}02V - 6{,}23V)}{7{,}02V} * 100\% = 11{,}3\%$$

während die Eingangsspannung um

$$Pr_a = \frac{(15{,}5V - 11{,}5V)}{15{,}5V} * 100\% = 25{,}8\%$$

abgenommen hat. Die Welligkeit ΔU der Eingangsspannung wird durch den Regler um den Faktor

$$z = \frac{1{,}4V}{0{,}035V} = 40$$

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.

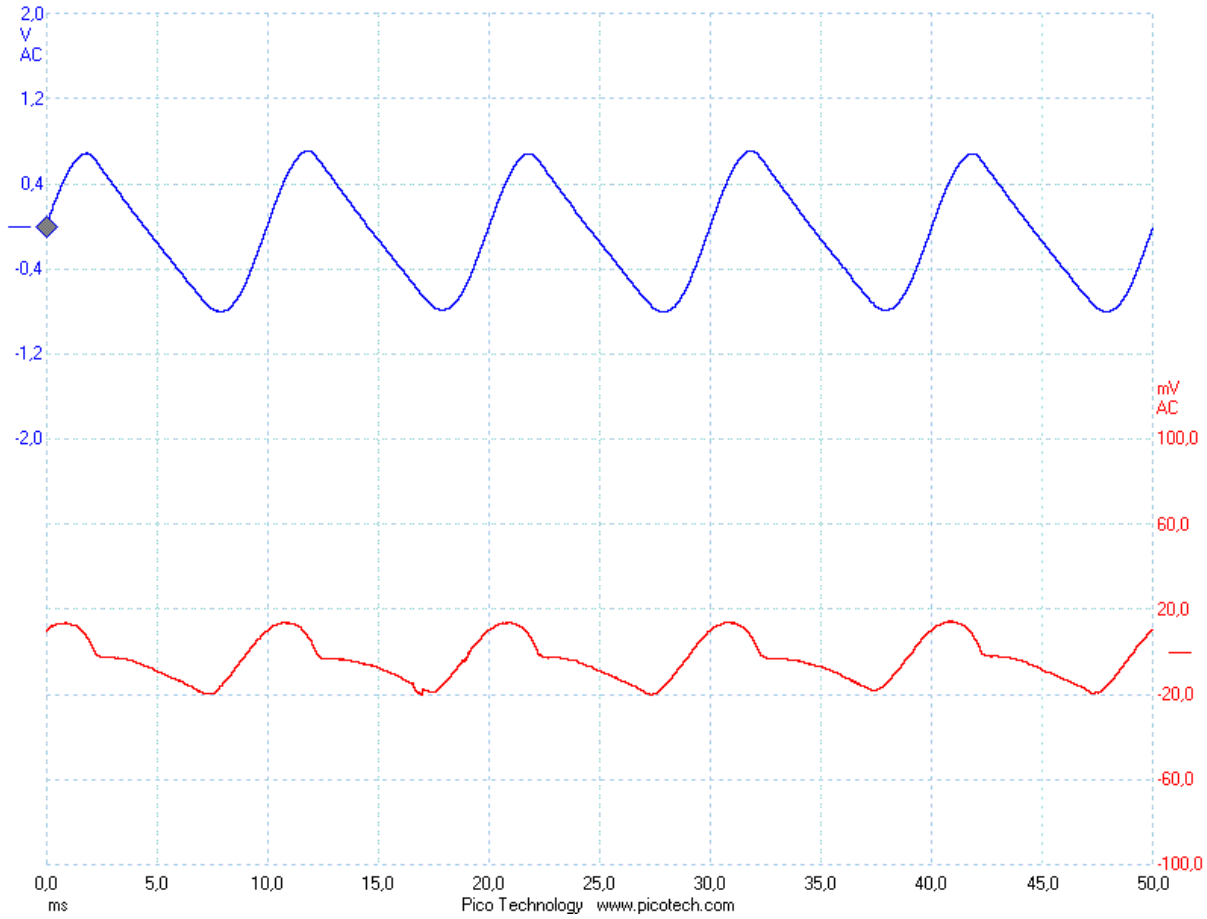


Abb.3: Welligkeit der Eingangs- und Ausgangsspannung

2.3 Operationsverstärker

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

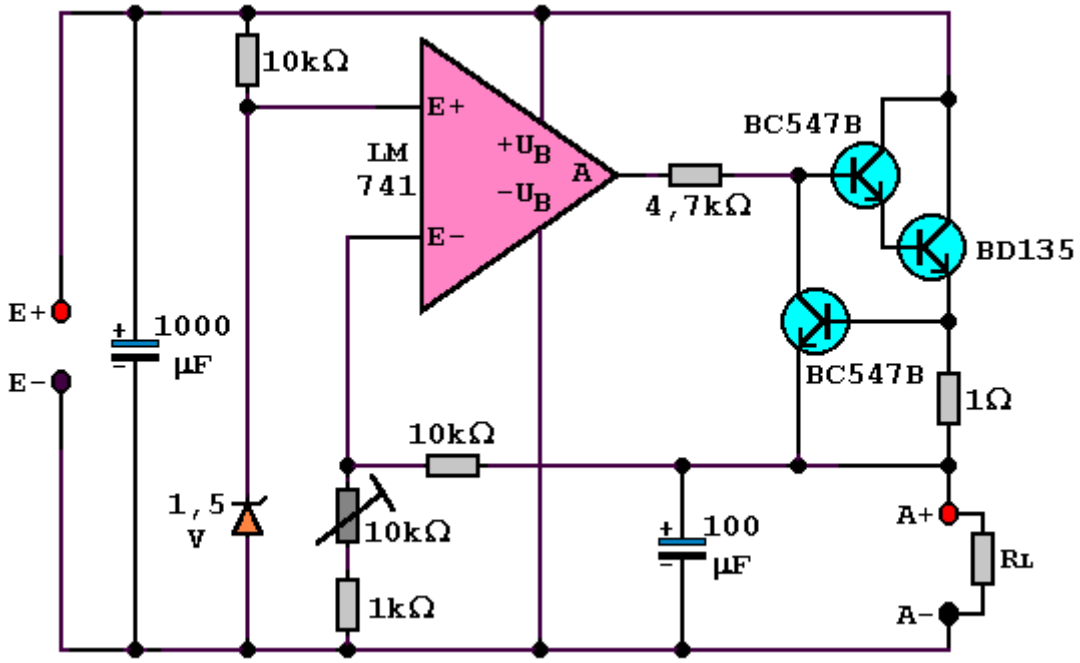


Abb.1: Spannungsregler mit Operationsverstärker

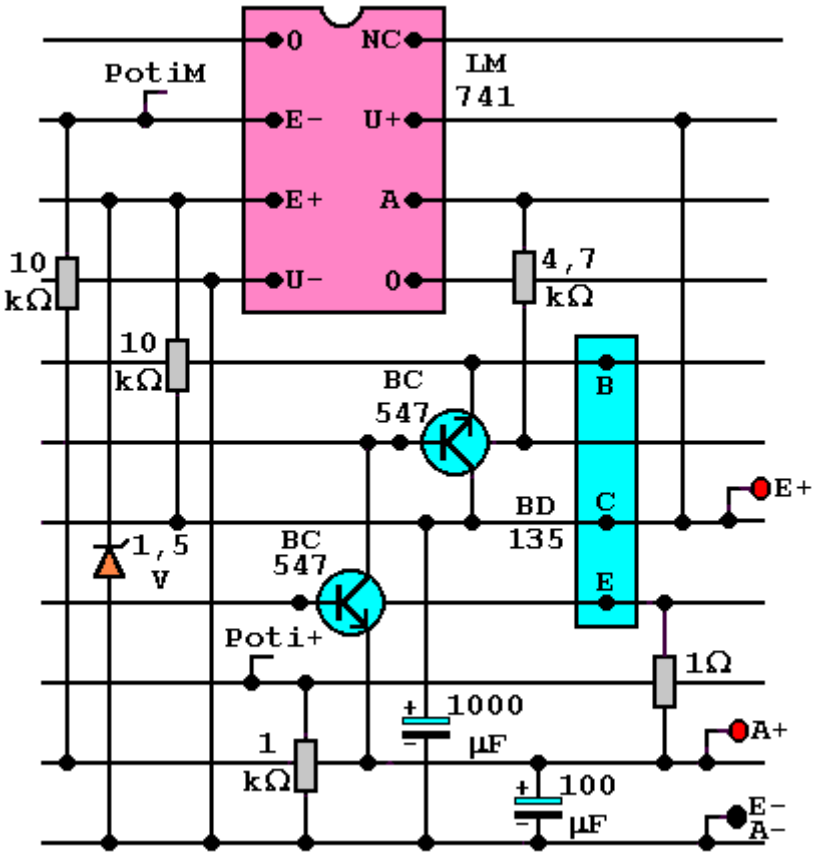


Abb.2: Verschaltung auf einer Lochrasterplatine

$$U_a = \frac{21k\Omega}{11k\Omega} * 1{,}5V = 2{,}9V$$

und bei voll aufgedrehtem Poti

$$U_a = \frac{11k\Omega}{1k\Omega} * 1{,}5V = 16{,}5V.$$

Versuch:

Aufbau:

Man schließt an den Eingang ein handelsübliches Netzteil mit U = 12 V und I = 500 mA an. An den Ausgang legt man ein Voltmeter, ein Amperemeter und ein Trimmpotentiometer 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 mittleren Wert U_a = 7 V. Mit zwei weiteren Volt- bzw. Amperemetern überwacht man den Eingangsstrom I_e und die Eingangsspannung U_e am Regler.

Durchführung:

Man stellt mit dem Potentiometer R_L verschiedene Ausgangströme 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]	η[%]
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

Messtabelle

Das Picoscope liefert die Kurven in Abb. 3. Aus der oberen Kurve liest man bei einem Ausgangsstrom von I_a = 0,3 A eine Eingangswelligkeit ΔU_e = 1,4 V und aus der unteren Kurve eine Ausgangswelligkeit von ΔU_a = 30 mV ab. Sie steigt am Eingang auf ΔU_e = 2,1 V und am Ausgang auf ΔU_a = 45 mV, wenn man den Ausgangsstrom auf I_a = 0,5 A erhöht.

Folgerung:

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

$$Pr_a = \frac{(6{,}99V - 6{,}93V)}{6{,}99V} * 100\% = 0{,}86\%$$

während die Eingangsspannung um

$$Pr_a = \frac{(16{,}3V - 11{,}9V)}{16{,}3V} * 100\% = 27\%$$

gefallen ist. Die Welligkeit ΔU 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 V wiederholt. Dann erhält man Messtabelle 1.

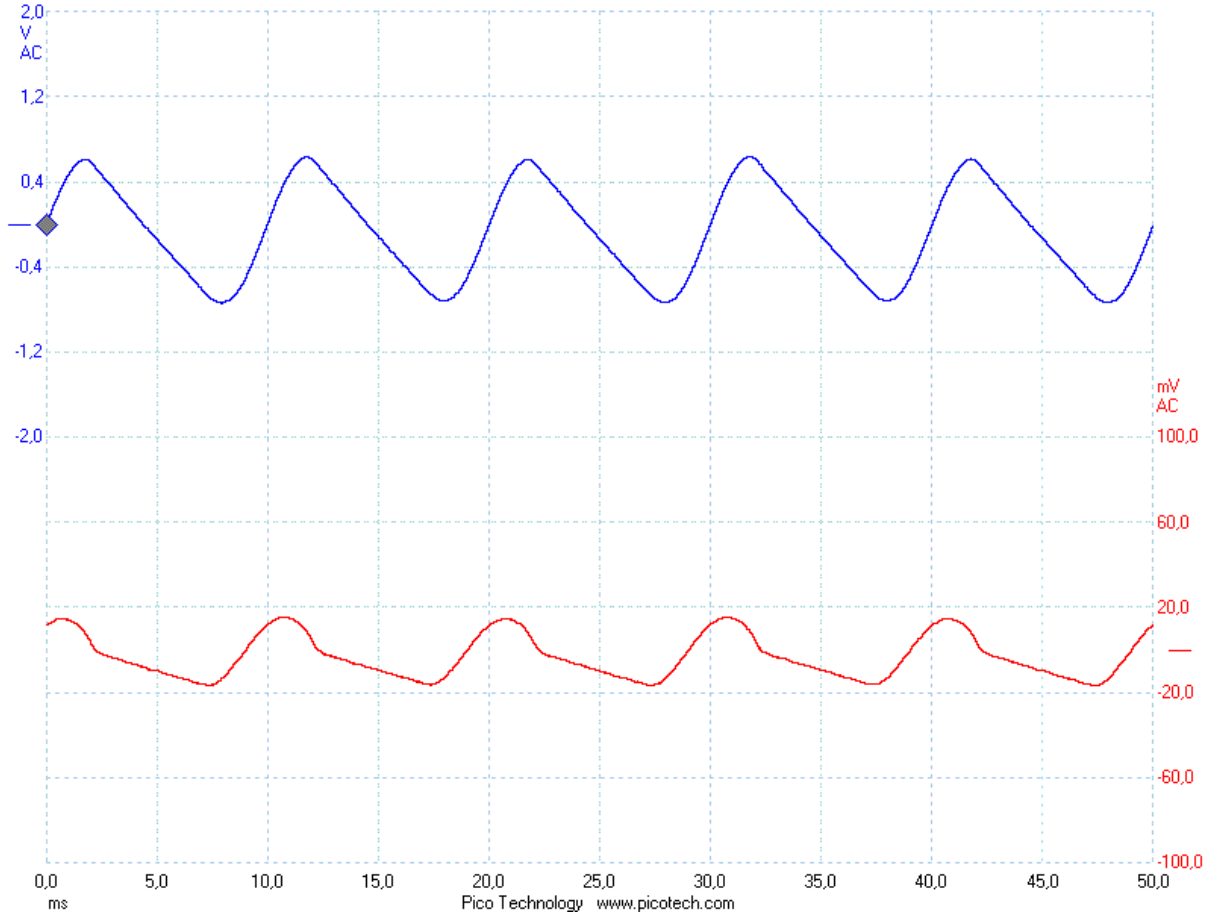


Abb.3: Welligkeit der Eingangs- und Ausgangsspannung

I_e[A]	U_e[V]	I_a[A]	U_a[V]	P_e[W]	P_a[W]	η[%]
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

Tabelle 1: Messtabelle

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 30 V liefern kann.

2.4.1 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 bzw. 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 9 V-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 µF und einem kleineren von 100 µF am Ausgang. Abb.1 zeigt den Schaltplan und Abb. 2 die 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 Pin der Eingang. Die Platine befestigt man mit zwei Holzschräubchen 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 Schaltlitze mit den entsprechenden Anschlüssen auf der Platine. Mit der fertigen Schaltung führt man den folgenden Versuch durch.

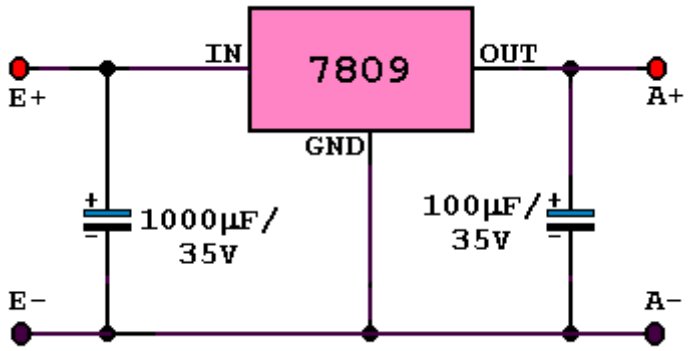


Abb.1: Spannungsregler 7809

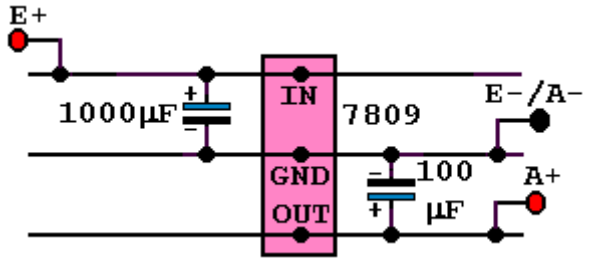


Abb.2: Verschaltung auf einer Lochrasterplatine

Versuch:

Aufbau:

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

Durchführung:

Man stellt mit dem Potentiometer R_L verschiedene Ausgangströme 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]	η[%]
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

Messtabelle

Mit dem Picoscope erhält man die Kurven in Abb. 3. Aus der oberen Kurve liest man bei einem Ausgangsstrom von I_a = 0,3 A eine Eingangswelligkeit ΔU_e = 1,4 V und aus der unteren Kurve eine Ausgangswelligkeit von ΔU_a = 20 mV ab. Sie steigt am Eingang auf ΔU_e = 2,1 V und am Ausgang auf ΔU_a = 30 mV, wenn man den Ausgangsstrom auf I_a = 0,5 A erhöht.

Folgerung:

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

$$Pr_a = \frac{(8{,}87V - 8{,}82V)}{8{,}87V} * 100\% = 0{,}56\%$$

während die Eingangsspannung um

$$Pr_e = \frac{(16{,}2V - 12{,}0V)}{16{,}2V} * 100\% = 25{,}9\%$$

gefallen ist. Die Welligkeit ΔU 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 Kapiteln gezeigt wird.

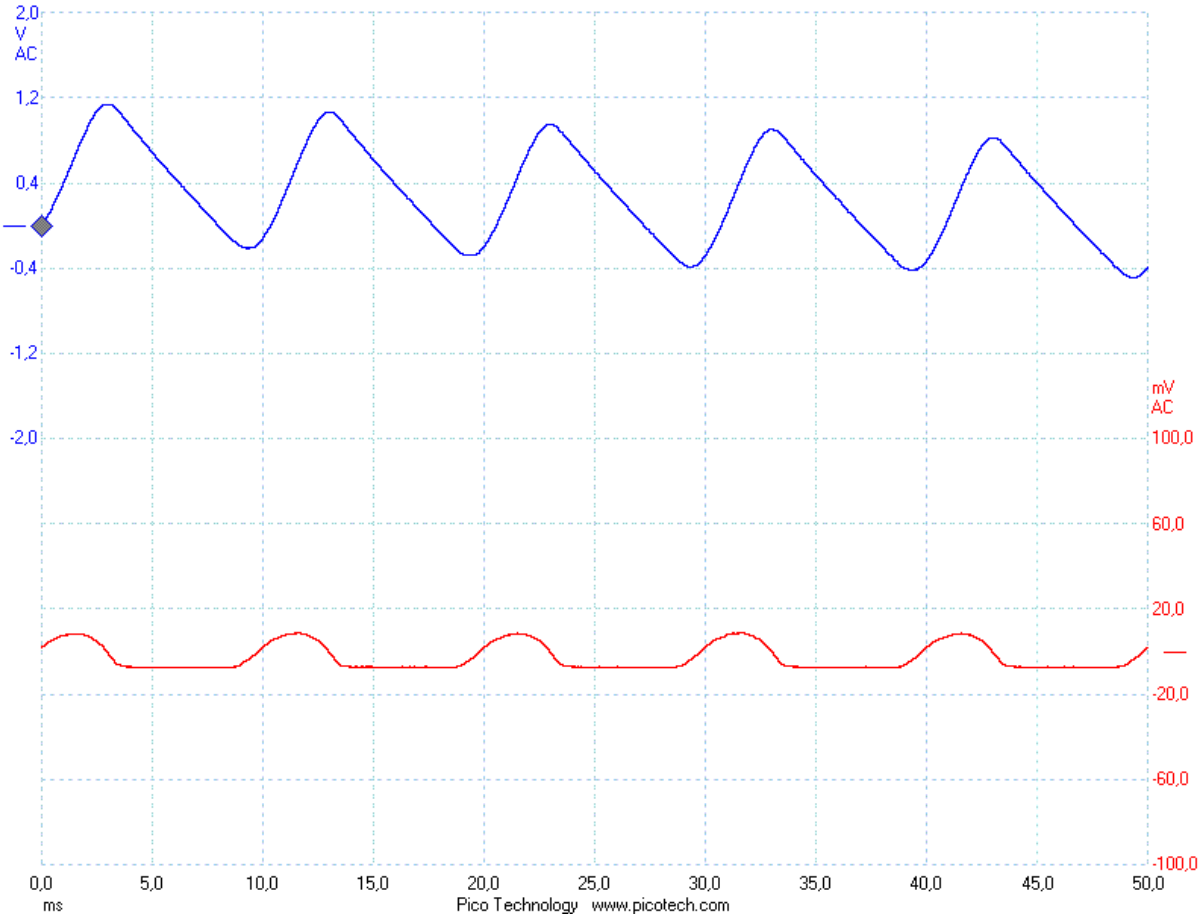


Abb.3: Welligkeit der Eingangs- und Ausgangsspannung

2.4.2 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. Die preiswerteste Variante trägt die Bezeichnung LM 317 LP und liefert am Ausgang eine Spannung U = 1,2V - 32V bei einer maximalen Stromstärke I_{max} = 0,1A, die zweite LM 317 K liefert am Ausgang U = 1,2V - 32V bei I_{max} = 1,5A, die dritte LM 317 T U = 1,2V – 37V bei I_{max} = 1,5A. Um den Regler betreiben zu können, benötigt man die Schaltung zeigt Abb. 1. Die Verschaltung auf einer Lochrasterplatine entnehmen Sie Abb. 2. Die Platine befestigt man mit zwei Holzschräubchen 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 Potentio-

meter. Man verlötet sie mit etwas Schaltlitze mit den entsprechenden Anschlüssen auf der Platine. Mit der fertigen Schaltung führt man den folgenden Versuch durch.

Versuch:

Aufbau:

Man schließt an den Eingang ein handelsübliches Netzteil mit U = 12 V und I = 500mA an. An den Ausgang legt man ein Voltmeter, ein Amperemeter und ein Trimmpotentiometer 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 Wert U_a = 9 V. Mit zwei weiteren Volt- bzw. Amperemetern überwacht man den Eingangsstrom I_e und die Eingangsspannung U_e am Regler.

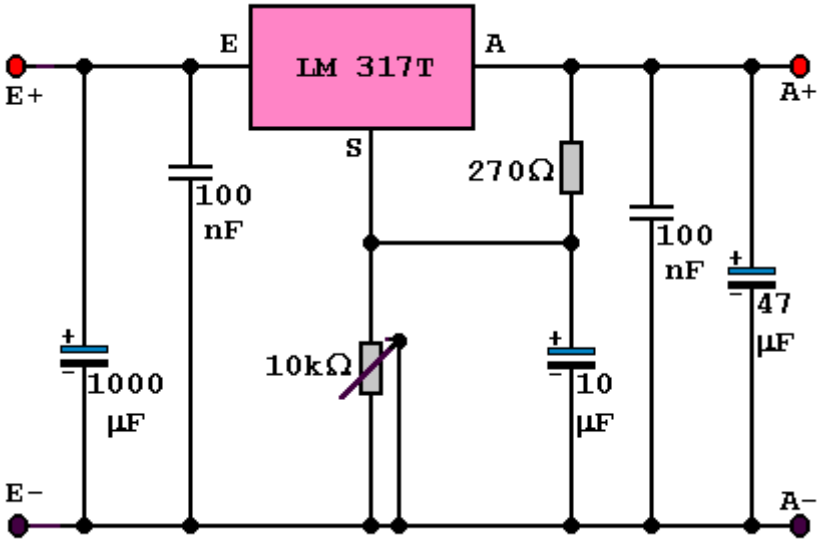


Abb.1: Schaltplan LM 317 T

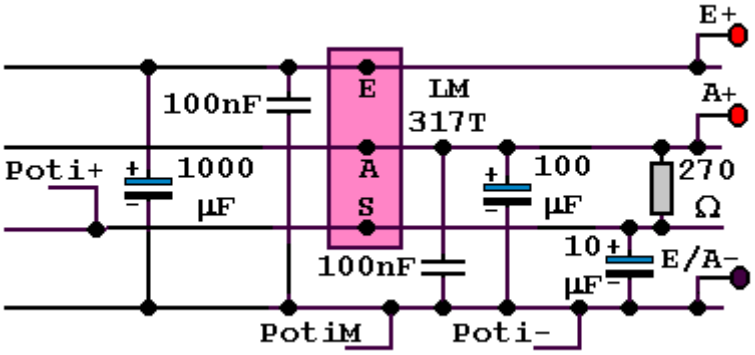


Abb.2: Verschaltung des LM 317 Tauf einer Lochrasterplatine

Durchführung:

Man stellt mit dem Potentiometer R_L verschiedene Ausgangströme 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 die untenstehende Messtabelle. 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 ΔU_e = 1,4 V und aus der unteren Kurve eine Ausgangswelligkeit von ΔU_a = 10 mV ab. Sie steigt am Eingang auf ΔU_e = 2,1 V und am Ausgang auf ΔU_a = 20 mV, wenn man den Ausgangsstrom auf I_a = 0,5 A erhöht.

I_e[A]	U_e[V]	I_a[A]	U_a[V]	P_e[W]	P_a[W]	η[%]
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

Messtabelle

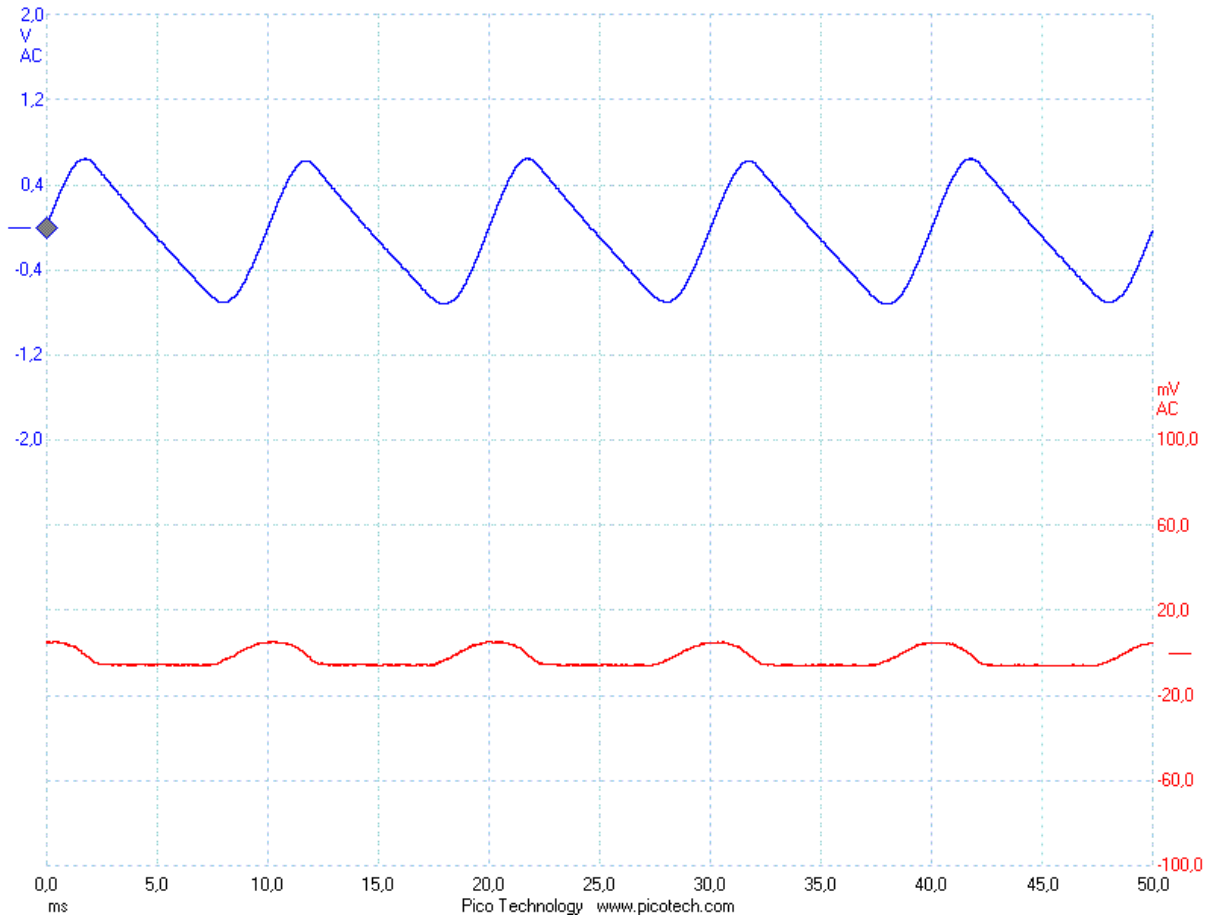


Abb.3: Welligkeit der Eingangs- und Ausgangsspannung

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 etwa den gleichen, geringen Steuerstrom benötigen.

2.4.3 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 V. Die Regler sind in einem TO 92 oder TO 220 Gehäuse untergebracht und können je nach Typ mit einem Dauerstrom von bis zu I_{max} = 7 A belastet werden. Sie sind für verschiedene feste Spannungen zwischen U_1 = 3V und U_2 = 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 U_R = 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 µF und einem kleineren von 100 µF 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 Pin der gemeinsame Minuspol. Die Platine befestigt man mit zwei Holzschräubchen 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 Schaltlitze mit den entsprechenden Anschlüssen auf der Platine. Mit der fertigen Schaltung führt man den gleichen Versuch wie mit den anderen Reglern durch.

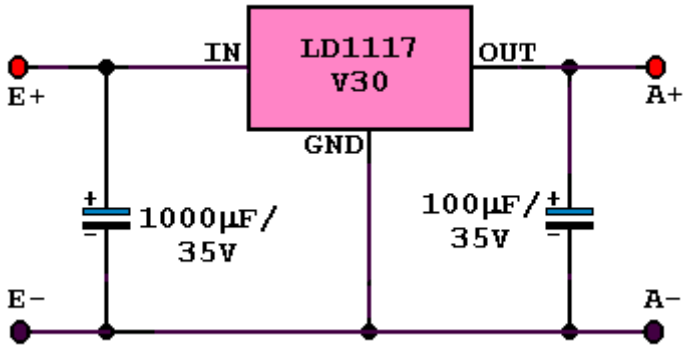


Abb.1: Low-Drop-Regler LD 1117V30

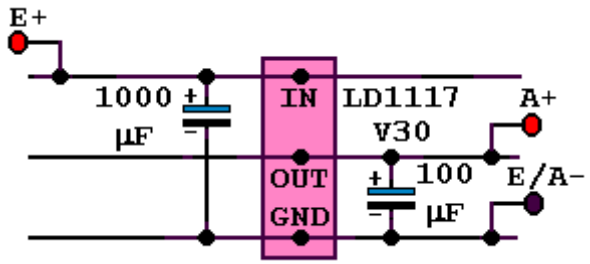


Abb.2: Verschaltung auf einer Lochrasterplatine

<u>Versuch 1:</u>

Aufbau:

Man schließt an den Eingang ein handelsübliches Netzteil mit U = 4,5 V und I = 500 mA an. An den Ausgang legt man ein Voltmeter, ein Amperemeter und ein Trimmpotentiometer R_L

mit einer Leistung P = 10 W. Amperemeter und Potentiometer werden in Reihe geschaltet, das Voltmeter parallel zum Ausgang. Mit zwei weiteren Volt- bzw. Amperemetern überwacht man den Eingangsstrom I_e und die Eingangsspannung U_e am Regler.

Durchführung:

Man stellt mit dem Potentiometer R_L verschiedene Ausgangströme 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 untenstehende Messtabelle. Mit dem Picoscope erhält man die Kurven in Abb. 3. Aus der oberen Kurve liest man bei einem Ausgangsstrom von I_a = 0,3 A Kurve eine Eingangswelligkeit ΔU_e = 1,4 V und aus der unteren Kurve eine Ausgangswelligkeit von ΔU_a = 15 mV ab. Sie steigt am Eingang auf ΔU_e = 2,1 V und am Ausgang auf ΔU_a = 25 mV, wenn man den Ausgangsstrom auf I_a = 0,5 A erhöht.

I_e[A]	U_e[V]	I_a[A]	U_a[V]	P_e[W]	P_a[W]	η[%]
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

Messtabelle

Folgerung:

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

$$Pr_a = \frac{(3{,}02V - 2{,}90V)}{3{,}02V} * 100\% = 4\%$$

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

$$Pr_a = \frac{(7{,}18V - 5{,}17V)}{5{,}17V} * 100\% = 28\%$$

gefallen. Die Welligkeit ΔU 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.

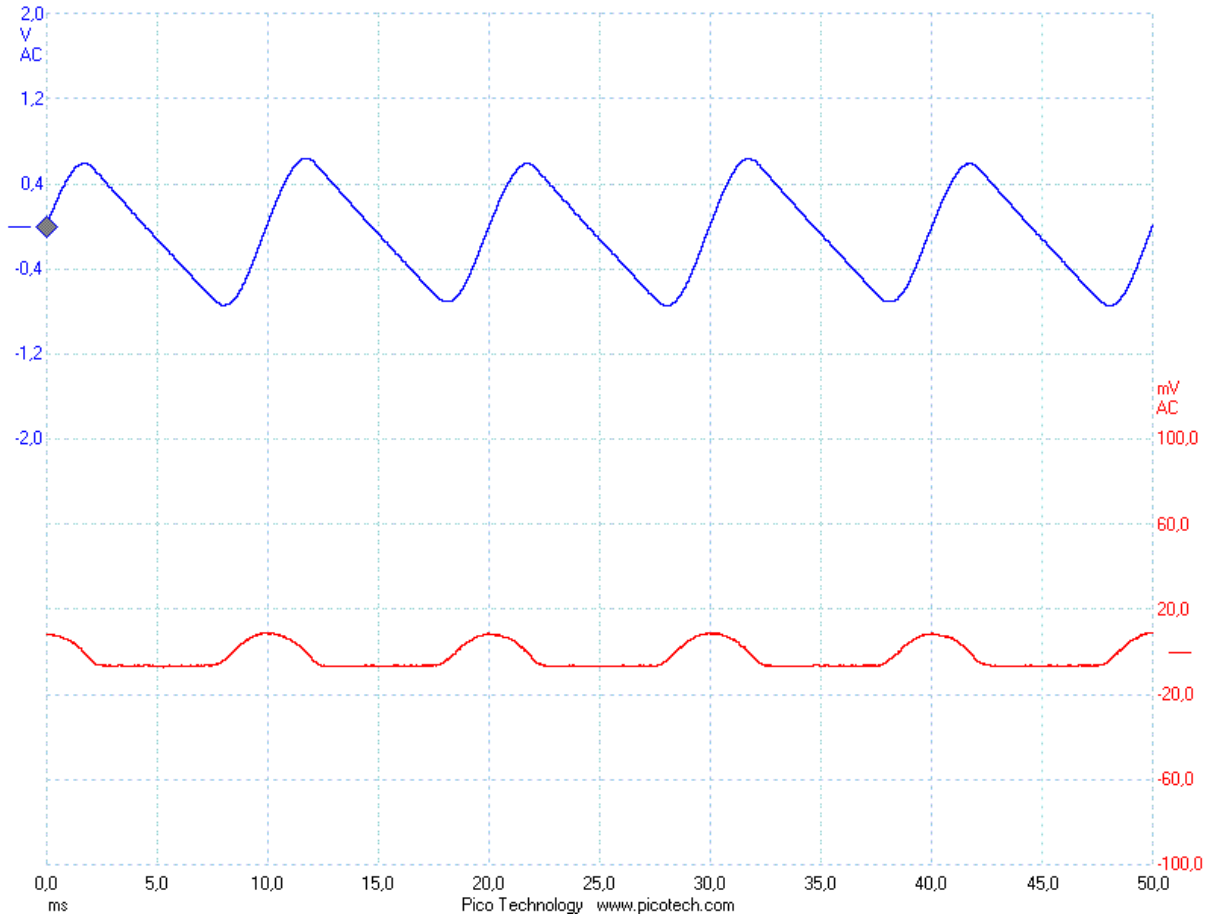


Abb.3: Welligkeit der Eingangs- und Ausgangsspannung

Versuch 2:

Aufbau:

s. Versuch 1

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 Versuch 1 vor.

Ergebnis:

Man erhält folgende Messtabelle:

I_e[A]	U_e[V]	I_a[A]	U_a[V]	P_e[W]	P_a[W]	η[%]
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

Messtabelle

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 U = 2 V 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 den des herkömmlichen Reglers. Das macht der folgende Versuch sehr deutlich.

<u>Versuch 3:</u>
Aufbau:
s. Versuch 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 U_A = 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 folgenden Messtabellen:

I_e[A]	U_e[V]	I_a[A]	U_a[V]	P_e[W]	P_a[W]	η[%]
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]	η[%]
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

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 Ausgangsspannung 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.

2.5 Verschiedenes

2.5.1 Grundlagen

Im Laufe der Zeit wurden für die Spannungsregler Erweiterungen und Schutzschaltungen entwickelt, die z. T. heute in Komplettregler 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, wie Abb. 1 und Abb. 2 zeigen.

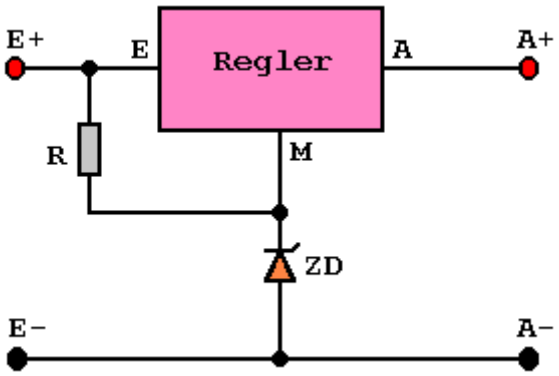


Abb.1: Spannungserweiterung

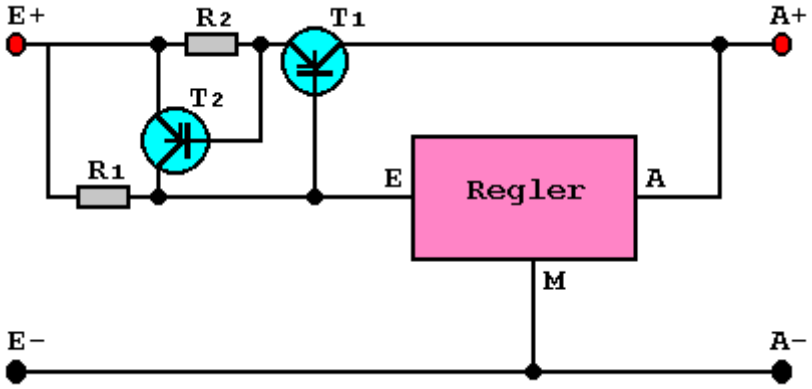


Abb.2: Stromerweiterung

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.

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.

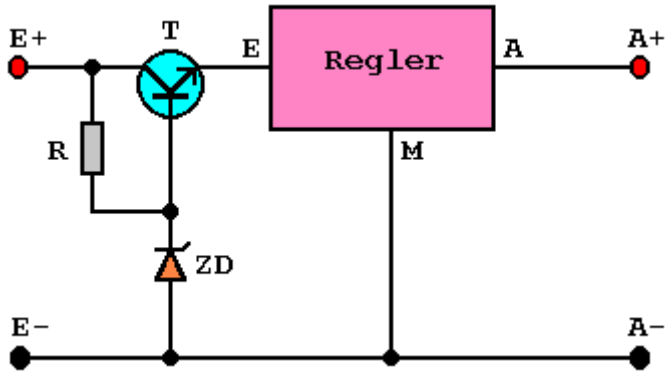


Abb.3: Schutz des Reglers vor Überspannung

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.

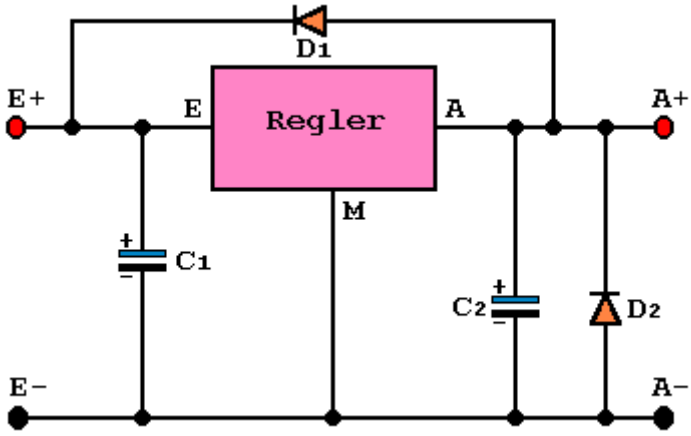


Abb.4: Schutz vor Verpolung

Abb.4 zeigt eine weitere häufig eingesetzte Schutzschaltung. 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 falsche Polung, auf die einige Spannungsregler sehr empfindlich regieren, in dem sie den Geist aufgeben.

2.5.2 Schaltungen

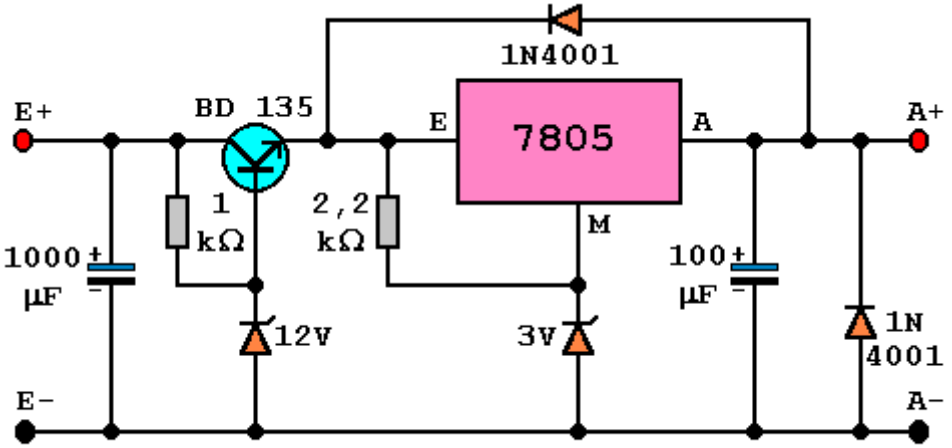


Abb.1: Erweiterungen zum Regler 7805

Abb.1 zeigt eine konkrete Schaltung, mit der man die Ausgangsspannung eines Reglers 7805 von U_1 = 5V auf U_2 = 8 V erhöhen kann. Dazu dient die Zenerdiode in der Steuerleitung des Reglers mit U_Z = 3V. Gleichzeitig übernimmt der Vortransistor BD 135 einen Teil der Eingangsspannung U_E und entlastet so den Regler, wenn sie U_E = 12 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.
In Abb.2 ist eine Schaltung zu sehen, mit der man den Ausgangsstrom des selbstgebauten Reglers erhöhen kann.

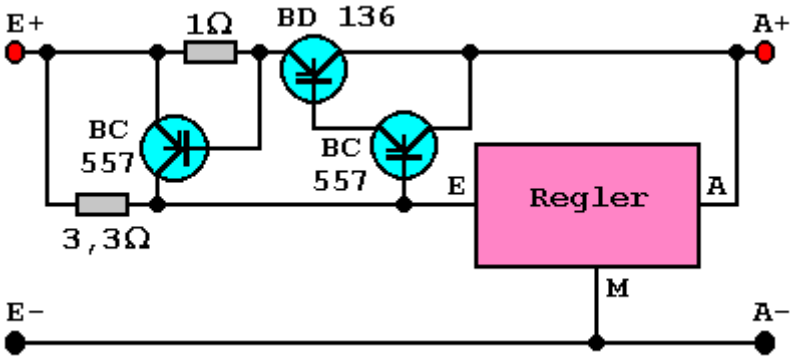


Abb.2: Erhöhung des Ausgangsstromes

Übersteigt der Strom durch den Regler einen Wert von

$$I_R = \frac{1{,}3V}{3{,}3\Omega} = 0{,}4A.$$

so schaltet der Darlingtontransistor, bestehend aus einem BD 136 und einem BC 557 immer mehr durch, da die Basis-Emitter-Spannung überschritten wird. Der Eingangsstrom 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

$$I_1 = \frac{0{,}65V}{1\Omega} = 0{,}65A.$$

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

$$I_2 = \frac{0{,}65V}{1\Omega} = 0{,}65A.$$

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

$$I_{ges} = I_1 + I_2 = 1{,}3A$$

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

$$R = \frac{1{,}3V + 0{,}65V}{0{,}65A} = 3\Omega$$

haben. Gängig ist der Wert R = 3,3 Ω, weshalb ich ihn in die Schaltung eingebaut habe. An ihm fallen die Basis-Emitter-Spannung des Darlingtontransistors und des Schutztransistors BC 557 ab.

3. Schaltregler

3.1 Grundlagen

3.1.1 Theorie

Wesentlich effizienter mit Wirkungsgraden zwischen 70% und 97% arbeiten so genannte Schaltregler. In ihnen wird die Gleichspannung der Stromquelle meist mit einer hohen Frequenz zwischen 10 kHz und 500 kHz ständig ein- und ausgeschaltet, also zerhackt. Einige arbeiten auch mit wesentlich kleineren Frequenzen im 100Hz-Bereich. 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 ein Kondensator, der die Spannung glättet. Die Diode sorgt dafür, dass der Strom nur in eine Richtung fließen kann. Schließlich benötigen die meisten elektronischen Schaltungen und LEDs Gleichstrom. Je nach Anordnung der Bauteile kann die Eingangsgleichspannung hoch- oder 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.

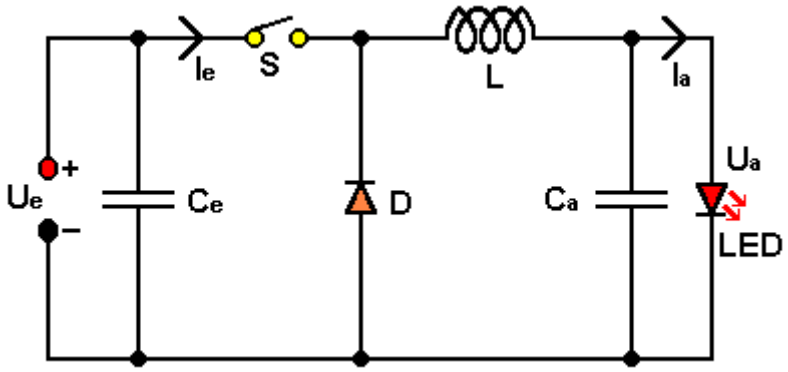


Abb.1a: Abwärtsregler

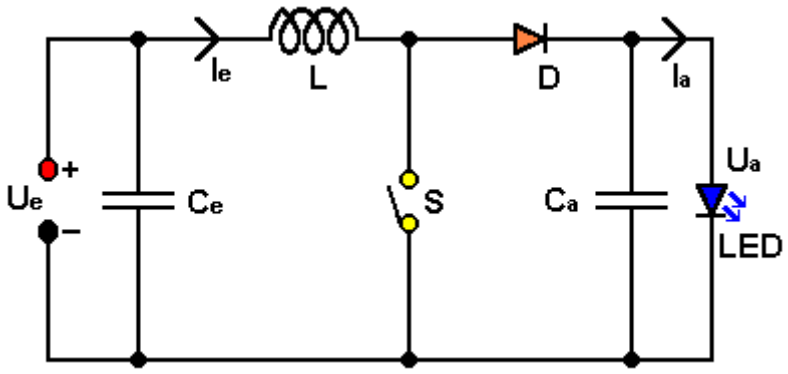


Abb.1b: Aufwärtsregler

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 wei-

ter 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. Man kann die Ausgangsspannung erhöhen, indem man die Einschaltzeit der Spule verlängert bzw. ihre Ausschaltzeit verkürzt.
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 bei gleicher Induktivität der Spule 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 0 V. 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 von der Spannungsquelle 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. Die Ausgangsspannung und der Ausgangsstrom steigen bzw. sinken. In der Praxis ersetzt man den Schalter durch einen Transistor, der mit einer Rechteckspannung an seiner Basis ein- und ausgeschaltet wird. Dazu benutzt man z.B. einen Multivibrator nach Abb. 2.

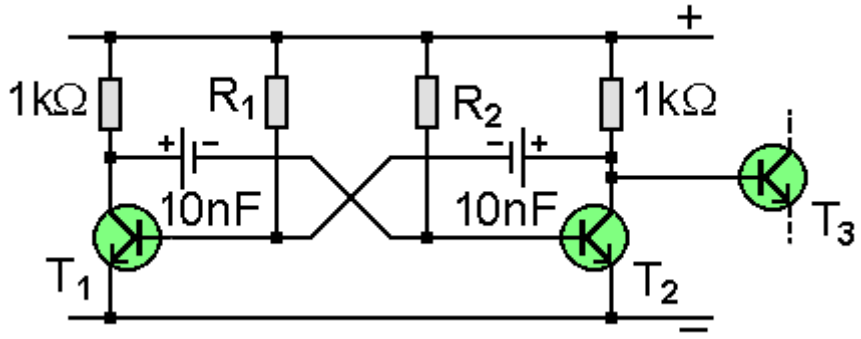


Abb.2: Multivibrator

Als Transistoren kann man die Typen BC 547 verwenden. In der Grundschaltung haben die beiden Basiswiderstände jeweils den gleichen Wert $R_1 = R_2 = 10$ kΩ. Der Transistor T_3 ist der Schalttransistor des angesteuerten Schaltreglers. Er ersetzt den mechanischen Schalter in den Abb. 1a und 1b.
Käufliche Schaltregler, auch Konverter genannt, arbeiten mit Frequenzen bis zu f = 500 kHz. Außerdem steuert man über den Rechteckgenerator das Tastverhältnis zwischen Ein- und Ausschaltzeit der Spule 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 Eingangsspannung ändert, weil z.B. die Batterie leerer wird. Die Einschaltphase verlän-

gert sich, die Ausschaltphase verkürzt sich. Der Eingangsstrom fließt länger. Die mittlere Eingangsstromstärke steigt, so dass die übertragene Energieportion trotz sinkender Eingangsspannung gleich bleibt. Führt man die Basiswiderstände des Multivibrators oder den Rückkopplungswiderstand als Potentiometer aus, so kann man die Helligkeit der LED 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 als Überträger ausgelegt sein, so dass ihre Energie auf einen zweiten, galvanisch getrennten Kreis übertragen wird. Das ist vor allem bei Netzbetrieb aus Sicherheitsgründen wichtig. Gleichzeitig kann über das Windungsverhältnis der beiden Spulen des Überträgers die Ausgangsspannung eingestellt werden.
Die Vorgänge in beiden Reglern sollen in den folgenden Versuchen mit zwei selbst entwickelten Schaltungen genauer untersucht werden. Sie arbeiten mit Frequenzen zwischen 2 kHz und 10 kHz. Daher kann man zum Aufzeichnen der Messkurven cassy mobile benutzen. Man könnte sie auch als Schülerversuche in einem Elektronikkurs durchführen. Sie arbeiten mit sehr geringen Spannungen und sind daher unbedenklich.

3.1.2 Abwärtsregler

Versuch 1a:

Durchführung:

Man baut die Schaltung nach Abb. 1 mit einer roten LED ohne den Widerstand R = 470 Ω auf und schaltet alle Geräte ein.

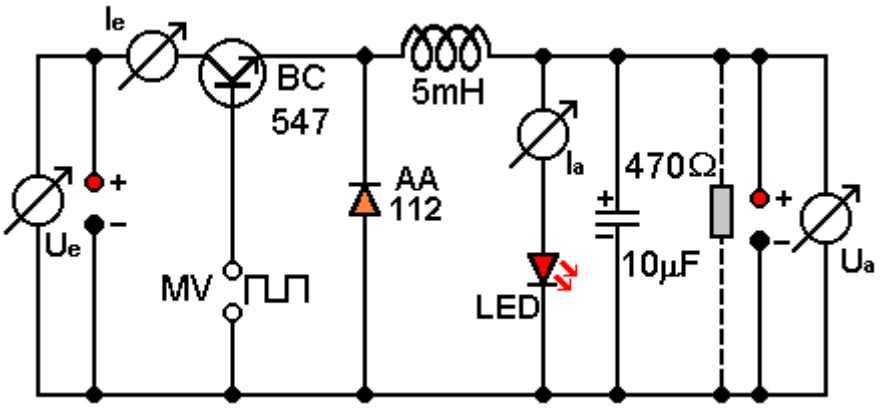


Abb. 1: Versuchsaufbau Abwärtsregler

Statt der Induktivität L = 5 mH kann man auch eine große Leybold-Spule mit n = 500 Windungen verwenden. Dann ergeben sich etwas abweichende Messwerte bei den folgenden Versuchen. Die Spannungsquelle am Eingang der Schaltung sollte eine stabilisierte Gleichspannung von U = 4,0 liefern. Man kann auch eine Flachbatterie mit U = 4,5 V verwenden. Als Rechteckgenerator MV benutzt man den Multivibrator nach Abb. 2 aus Kapitel 3.1.1, der ebenfalls an die Spannungsquelle angeschlossen wird. Man misst mit cassy mobile oder einem Digitalmultimeter nacheinander die beiden Spannungen U_e und U_a und ebenso die beiden Ströme I_e und I_a.

Beobachtung:
Die rote LED leuchtet, ohne durchzubrennen. Würde man die Eingangsspannung von U = 4 V direkt an die rote LED legen, so würde sie innerhalb kurzer Zeit den Geist aufgeben, da rote LEDs maximal mit U = 2,2 V betrieben werden dürfen. Man erhält folgende Messwerte:

$U_e = 4{,}0\ V$
$U_a = 1{,}9\ V$
$I_e = 8{,}6\ mA$
$I_a = 3{,}8\ mA.$

Auswertung:
Damit ergeben sich für die Ein- und Ausgangsleistungen folgende Werte:

$$P_e = U_e * I_e = 4{,}0V * 8{,}6mA = 34{,}4mW$$
$$P_a = U_a * I_a = 1{,}90V * 3{,}8mA = 7{,}2mW$$

und für den Wirkungsgrad η

$$\eta = \frac{P_a}{P_e} * 100\% = \frac{7{,}2mW}{34{,}4mW} * 100\% = 21\%.$$

Der Wirkungsgrad der Schaltung ist sehr bescheiden. Das liegt vor allem an der konstanten Verlustleistung durch den Multivibrator von etwa P_M = 25 mW. Rechnet man sie heraus, so ergibt sich ein Wirkungsgrad η

$$\eta = \frac{P_a}{P_e} * 100\% = \frac{7{,}2mW}{34{,}4mW - 25mW} * 100\% = 76{,}6\%.$$

Für den Multivibrator würde eine Betriebsspannung von U = 1, 5 V ausreichen, wie in den folgenden Versuchen gezeigt wird. Damit würde sich seine Verlustleistung auf einen erträglichen Wert von P_M = 3,5 mW reduzieren und es würde sich ein realistischer Wert für den Wirkungsgrad der Schaltung von η = 56 % ergeben.

<u>Versuch 1b:</u>
Durchführung:
Man benutzt den gleichen Versuchsaufbau wie in Versuch 1a, ersetzt aber die LED durch einen Widerstand R = 470 Ω. Man zeichnet den Spannungsverlauf am Messwiderstand mit cassy mobile mit und ohne Kondensator auf. An cassy mobile wählt man als Messzeit t = 500 µs bei einer Auflösung von Δt = 2µs.
Beobachtung:
Man erhält die Messkurven in Abb. 2a und 2b.
Ergebnis:
Die Kurven bestätigen die Überlegungen zur Funktionsweise eines Abwärtsreglers. Während der Einschaltzeit der Spule baut sich in ihr ein Magnetfeld auf. Gleichzeitig fließt der Strom durch die LED und lädt den Kondensator auf. In der Ausschaltzeit bricht das Magnetfeld zu-

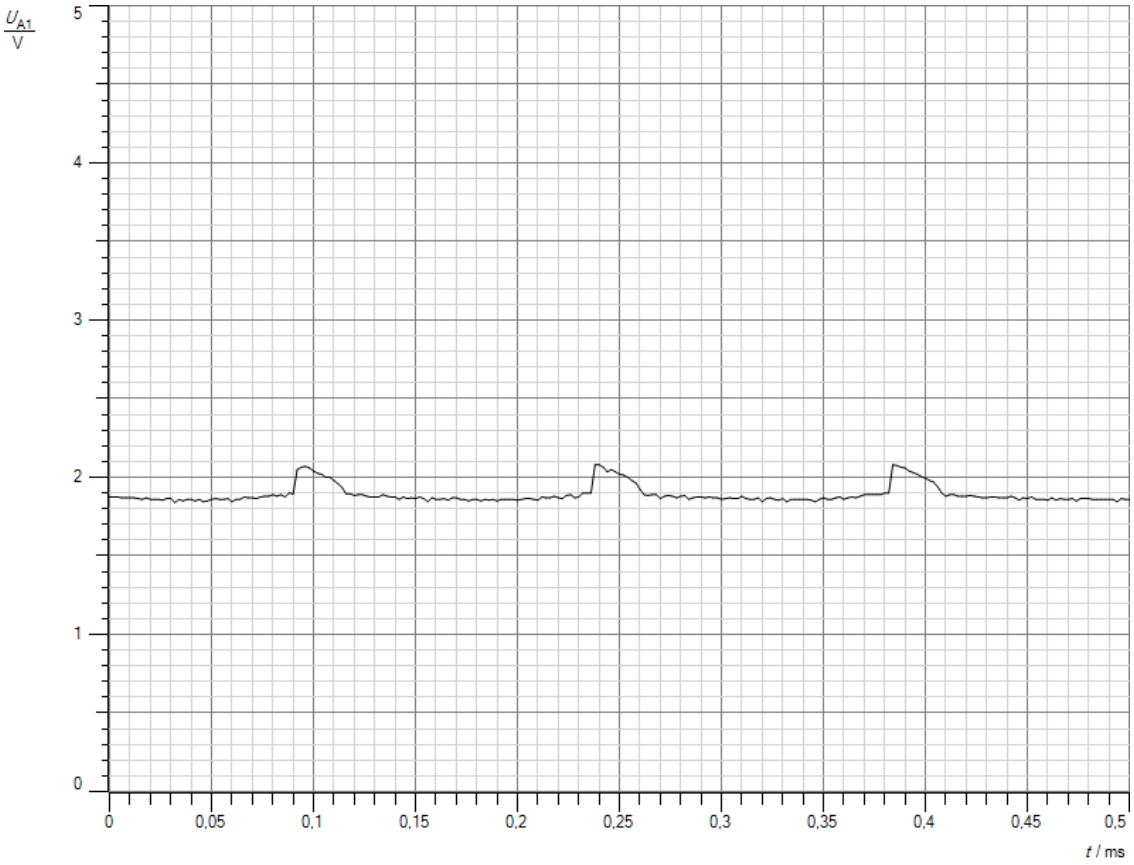


Abb. 2a: Ausgangsspannung mit Kondensator

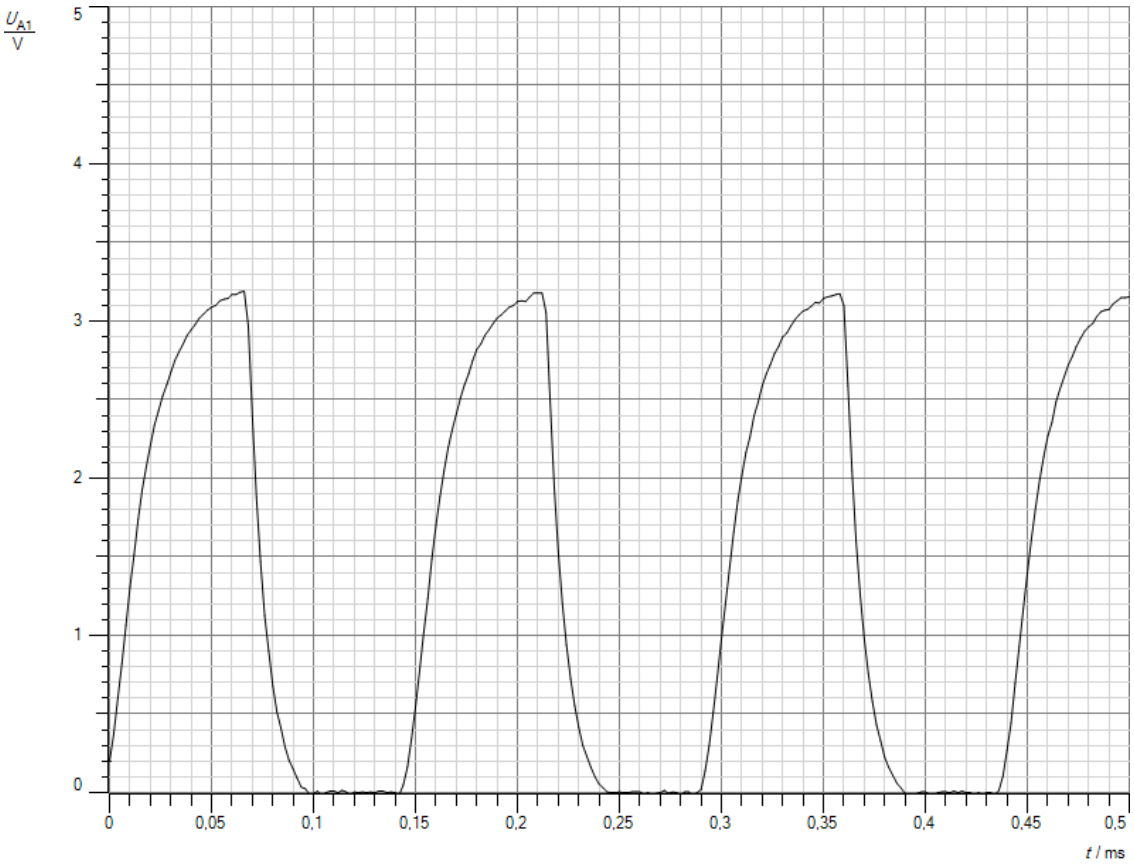


Abb. 2b: Ausgangsspannung ohne Kondensator

sammen und hält den Strom für kurze Zeit aufrecht. Die LED wird in dieser Zeit hauptsächlich vom Kondensator angetrieben.
Um die Ausgangsleistung zu erhöhen, muss man die Ausschaltzeit der Spule verkürzen und die Einschaltzeit verlängern. Dazu verkleinert man im Multivibrator den Basiswiderstand an T_1 und vergrößert ihn an T_2. Damit die Frequenz in etwa gleich bleibt, muss die Summe der Widerstände wie zuvor näherungsweise R_{ges} = 20 kΩ ergeben.

Versuch 1c:
Durchführung:
Man benutzt den gleichen Versuchsaufbau wie in Versuch 1a mit R_1 = 4,7 kΩ und R_2 = 15 kΩ.
Beobachtung:
Die rote LED leuchtet wesentlich heller als in Versuch 1a. Man erhält folgende Messwerte:

$$U_e = 4{,}0\ V$$
$$U_a = 2{,}17\ V$$
$$I_e = 27{,}0\ mA$$
$$I_a = 21{,}1\ mA.$$

Auswertung:
Die LED wird mit optimalen Werten betrieben. Für die Ein- und Ausgangsleistungen ergeben sich folgende Werte:

$$P_e = U_e * I_e = 4{,}0V * 27{,}0mA = 108mW$$
$$P_a = U_a * I_a = 2{,}17V * 21{,}1mA = 45{,}8mW$$

und für den Wirkungsgrad η

$$\eta = \frac{P_a}{P_e} * 100\% = \frac{45{,}8mW}{108mW} * 100\% = 42{,}4\%.$$

Der Wirkungsgrad der Schaltung ist gegenüber Versuch 1a scheinbar deutlich gestiegen. Da die Verlustleistung des Multivibrators konstant bleibt, fällt sie prozentual weniger ins Gewicht. Berücksichtigt man sie bei U = 1,5 V mit P_M = 3,5 mW statt mit P_M = 25 mW bei U = 4,5 V, so ergibt sich ein Wirkungsgrad von η = 52,9%.

<u>Versuch 1d:</u>
Durchführung:
Man benutzt den gleichen Versuchsaufbau wie in Versuch 1c, ersetzt aber die LED durch einen Widerstand R = 470 Ω. Man zeichnet den Spannungsverlauf am Messwiderstand mit cassy mobile mit und ohne Kondensator auf. An cassy mobile wählt man als Messzeit t = 500 µs bei einer Auflösung von Δt = 2µs.
Beobachtung:
Man erhält die Messkurven in Abb. 2c und 2d.

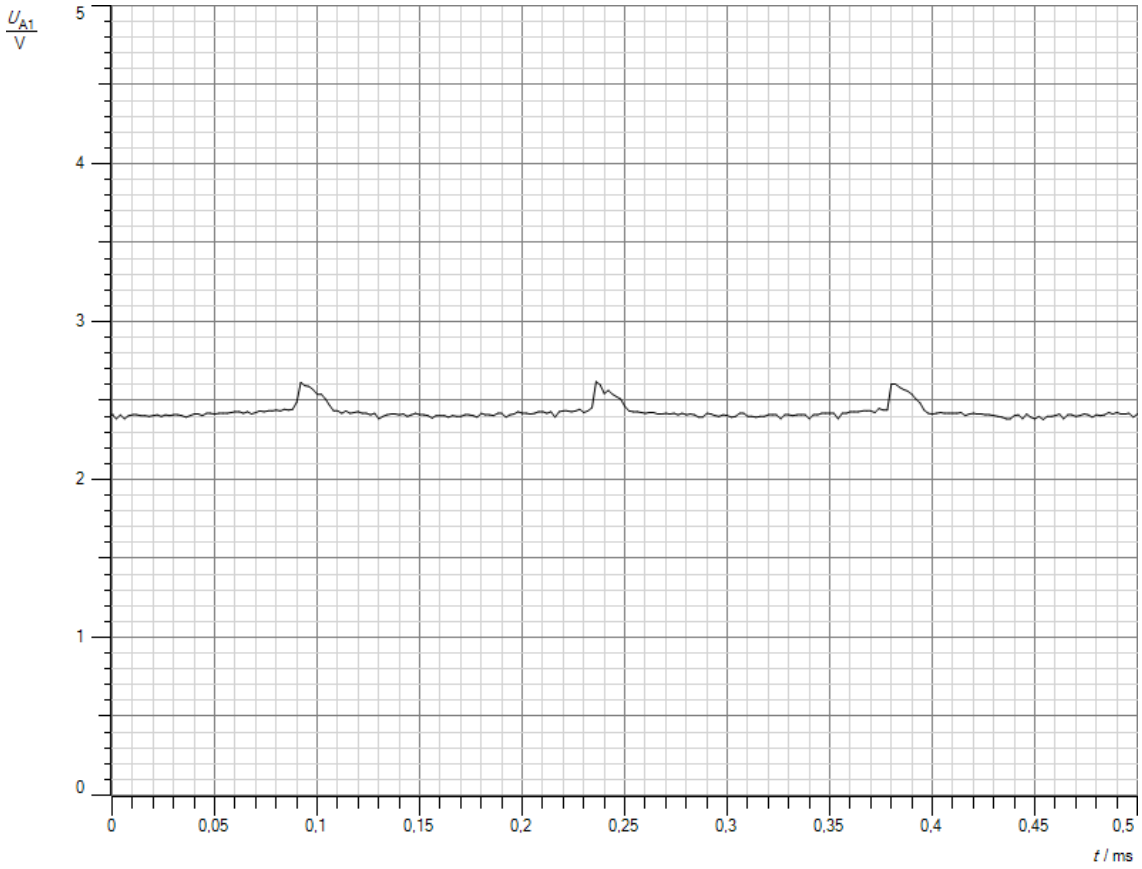


Abb. 2c: Ausgangsspannung mit Kondensator

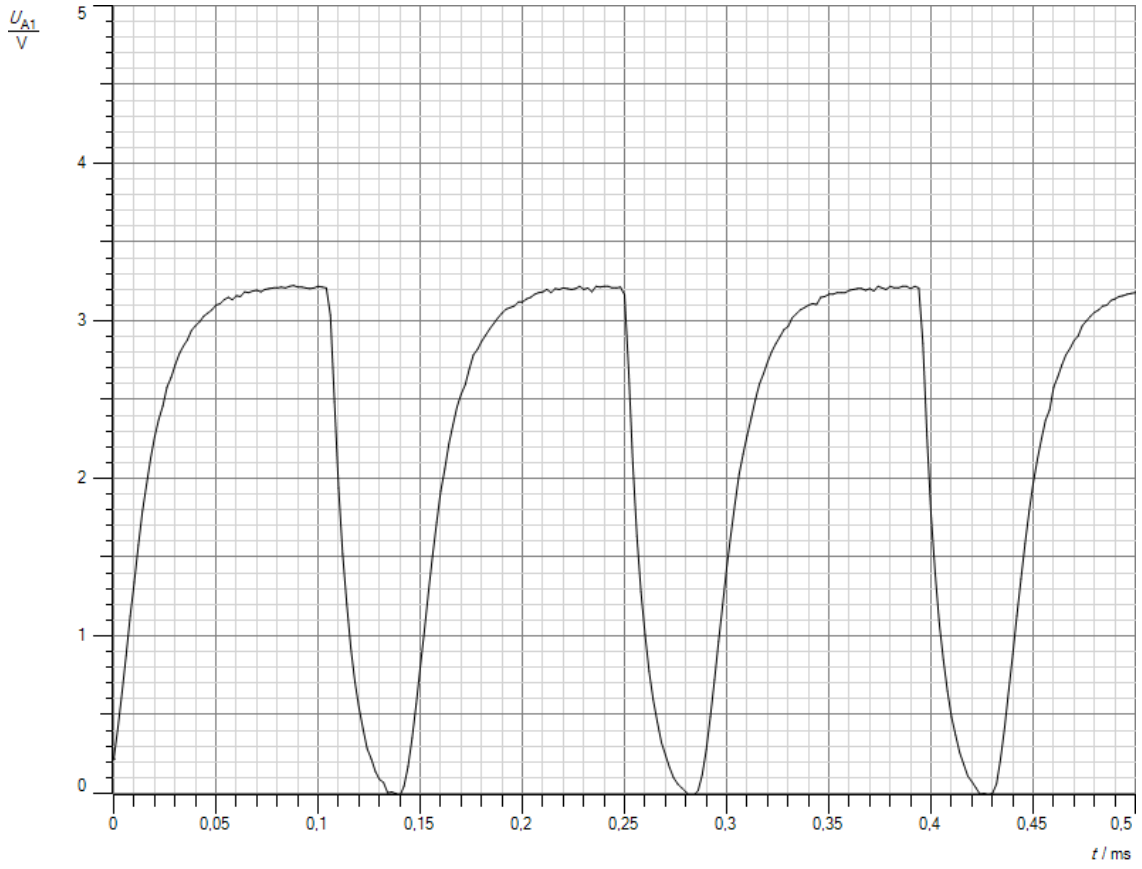


Abb. 2d: Ausgangsspannung ohne Kondensator

Ergebnis:
Die Kurven bestätigen die Überlegungen. Die Leerlaufzeit der Spule wurde deutlich verkürzt, die Einschaltzeit merklich verlängert. Die Frequenz ist nahezu gleich geblieben. Die Ausgangsspannung am Kondensator steigt von U_1 = 1,9 V auf U_2 = 2,4 V.

Man kann die Ausgangsleistung des Abwärtsreglers auch durch Rückkopplung steigern, wie die folgenden Versuche zeigen.

Versuch 1e:
Durchführung:
Man benutzt den gleichen Versuchsaufbau wie in Versuch 1a mit R_1 = 10 kΩ und R_2 = 10 kΩ an den Basen der beiden Transistoren des Multivibrators. Man legt den Basiswiderstand von T_2 jedoch nicht an die Betriebsspannung, sondern an den Ausgang der Spule des Reglers.
Beobachtung:
Die rote LED leuchtet deutlich heller als in Versuch 1a, aber etwas weniger hell als in Versuch 1c. Man erhält folgende Messwerte:

$$U_e = 4{,}0\ V$$
$$U_a = 2{,}01\ V$$
$$I_e = 13{,}8\ mA$$
$$I_a = 8{,}9\ mA.$$

Auswertung:
Für die Ein- und Ausgangsleistungen erhält man:

$$P_e = U_e * I_e = 4{,}0V * 13{,}8mA = 55{,}2mW$$
$$P_a = U_a * I_a = 2{,}01V * 8{,}9mA = 17{,}9mW$$

und für den Wirkungsgrad η

$$\eta = \frac{P_a}{P_e} * 100\% = \frac{17{,}9mW}{55{,}2mW} * 100\% = 32\%.$$

Der Wirkungsgrad der Schaltung ist gegenüber Versuch 1a scheinbar deutlich gestiegen. Da die Verlustleistung des Multivibrators konstant bleibt, fällt sie prozentual weniger ins Gewicht. Berücksichtigt man sie wie bei Versuch 1d, so ergibt sich ein Wirkungsgrad von η = 53,1%.

Versuch 1f:
Durchführung:
Man benutzt den gleichen Versuchsaufbau wie in Versuch 1e, ersetzt aber die LED durch einen Widerstand R = 470 Ω. Man zeichnet den Spannungsverlauf am Messwiderstand mit cassy mobile mit und ohne Kondensator auf. An cassy mobile wählt man als Messzeit t = 500 µs bei einer Auflösung von Δt = 2µs.
Beobachtung:
Man erhält die Messkurven in Abb. 2e und 2f.

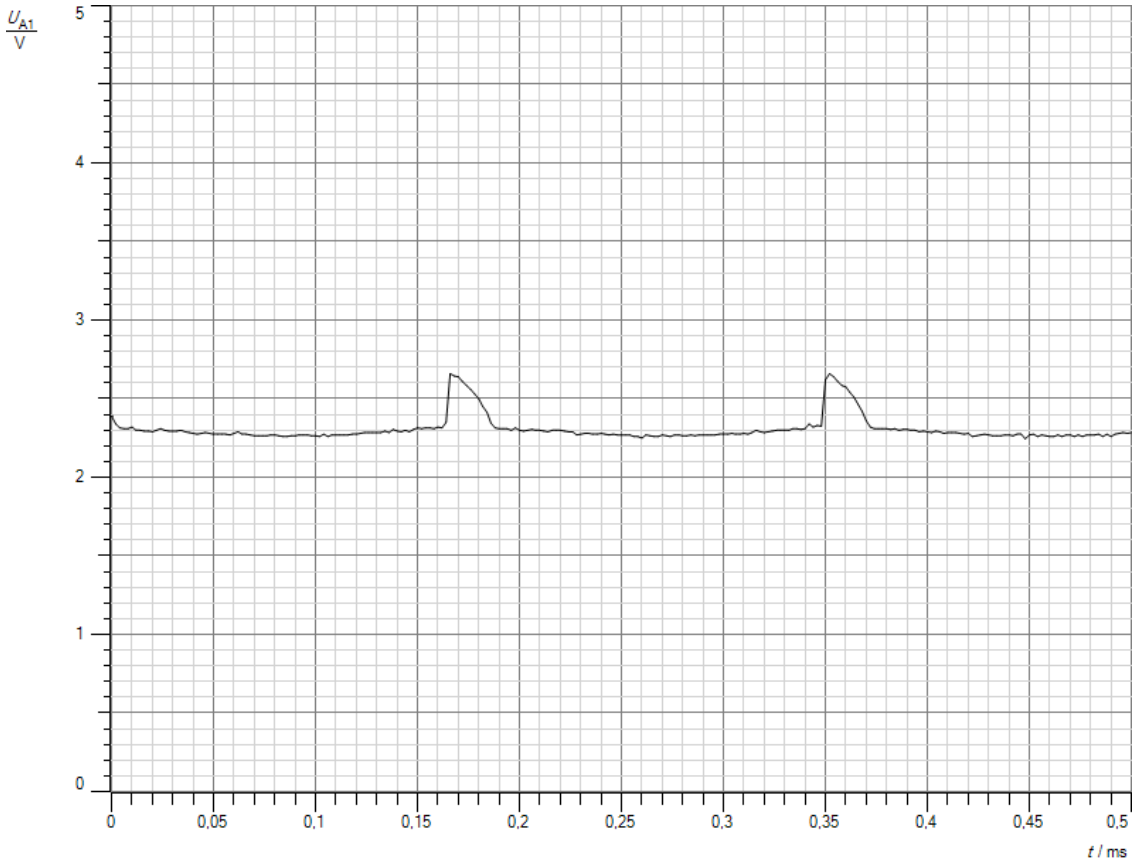


Abb. 2e: Ausgangsspannung mit Kondensator

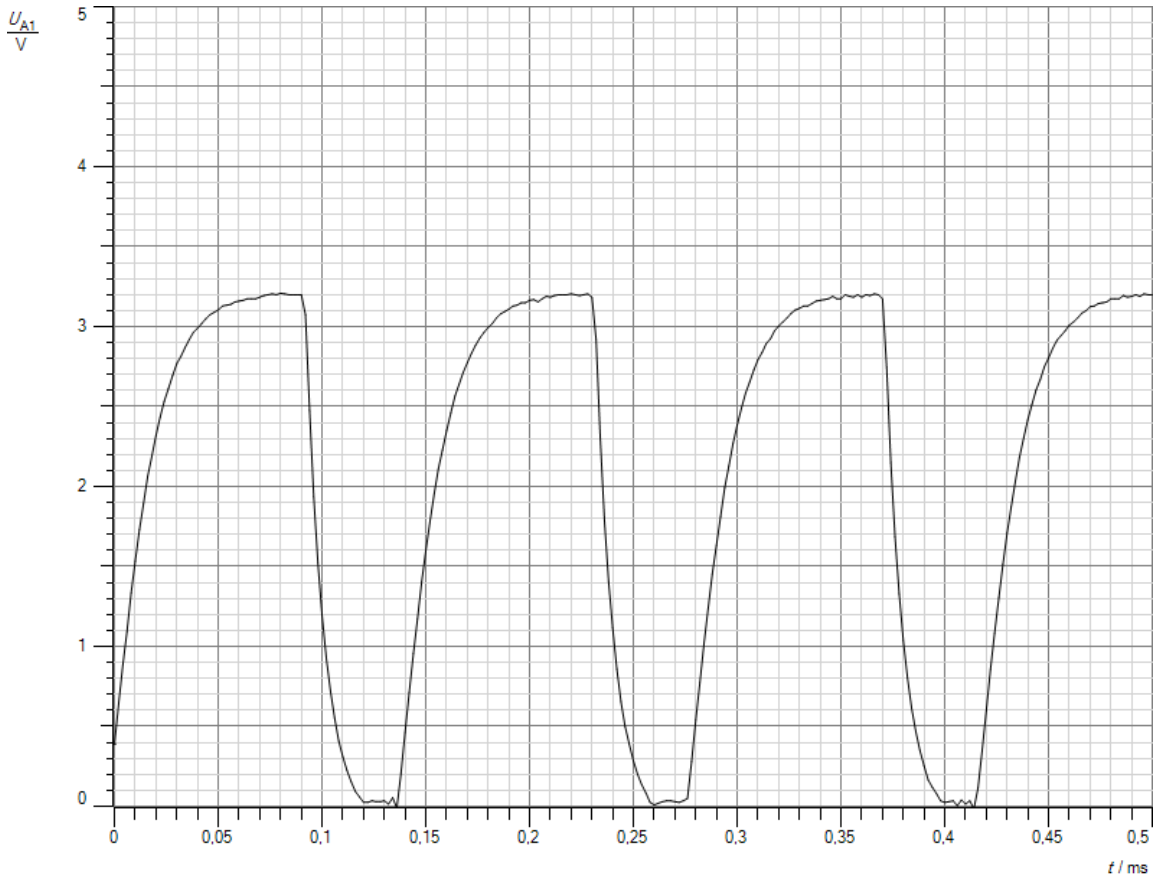


Abb. 2f: Ausgangsspannung ohne Kondensator

Ergebnis:
Durch die Rückkopplung verkürzt sich die Ausschaltzeit der Spule, die Einschaltzeit verlängert sich, wenn auch nicht so stark wie bei der unsymmetrischen Beschaltung des Multivibrators in Versuch 1c. Die Frequenz ist nahezu gleich geblieben. Kombiniert man beide Effekte, so erhält man einen optimal angepassten Abwärtsregler. Die Ausgangsspannung am Kondensator steigt von U_1 = 1,9 V auf U_2 = 2,3 V.

Um die LED zu dimmen, ersetzt man den Basiswiderstand R_2 an T_2 des Multivibrators durch eine Reihenschaltung aus einem Festwiderstand R_{21} und einem Trimmer R_{22}.

Versuch 1g:
Durchführung:
Man benutzt den gleichen Versuchsaufbau wie in Versuch 1a mit R_1 = 2,2 kΩ und R_2 als Reihenschaltung aus einem Festwiderstand R_{21} = 3,3 kΩ und einem Trimmer R_{22} = 10 kΩ an den Basen der beiden Transistoren T_1 und T_2 des Multivibrators. Man dreht den Trimmer voll auf bzw. zu und misst jeweils die Spannung an der LED.
Beobachtung:
Die rote LED leuchtet hell, wenn man den Trimmer voll aufdreht und nur schwach, wenn er zugedreht ist. Die Spannung an der LED schwankt zwischen U_1 = 1,77 V und U_2 = 2,16 V.
Erklärung:
Ist der Trimmer zu, so wird die Spule nur für kurze Zeit eingeschaltet. Sie speichert wenig Energie. Dreht man den Trimmer auf, so verlängert sich die Einschaltzeit der Spule. Sie nimmt mehr Energie auf und kann die Spannungslücken besser ausgleichen. Außerdem sinken die Frequenz und die Zahl der Spannungslücken pro s. Die Spannung am Kondensator und damit an der LED steigt.

Versuch 1h:
Durchführung:
Man benutzt den gleichen Versuchsaufbau wie in Versuch 1g, ersetzt aber die LED durch einen Widerstand R = 470 Ω. Man zeichnet den Spannungsverlauf am Messwiderstand mit cassy mobile mit und ohne Kondensator auf. An cassy mobile wählt man als Messzeit t = 500 µs bei einer Auflösung von Δt = 2µs.
Beobachtung:
Man erhält die Messkurven in Abb. 2g bis 2j:
Auswertung:
Die Kurven bestätigen die Überlegungen aus Versuch 1g voll und ganz. Die Spannung am Kondensator steigt von U_1 = 0,75 V bei zugedrehtem Trimmer auf U_2 = 2,3 V bei aufgedrehtem Trimmer.

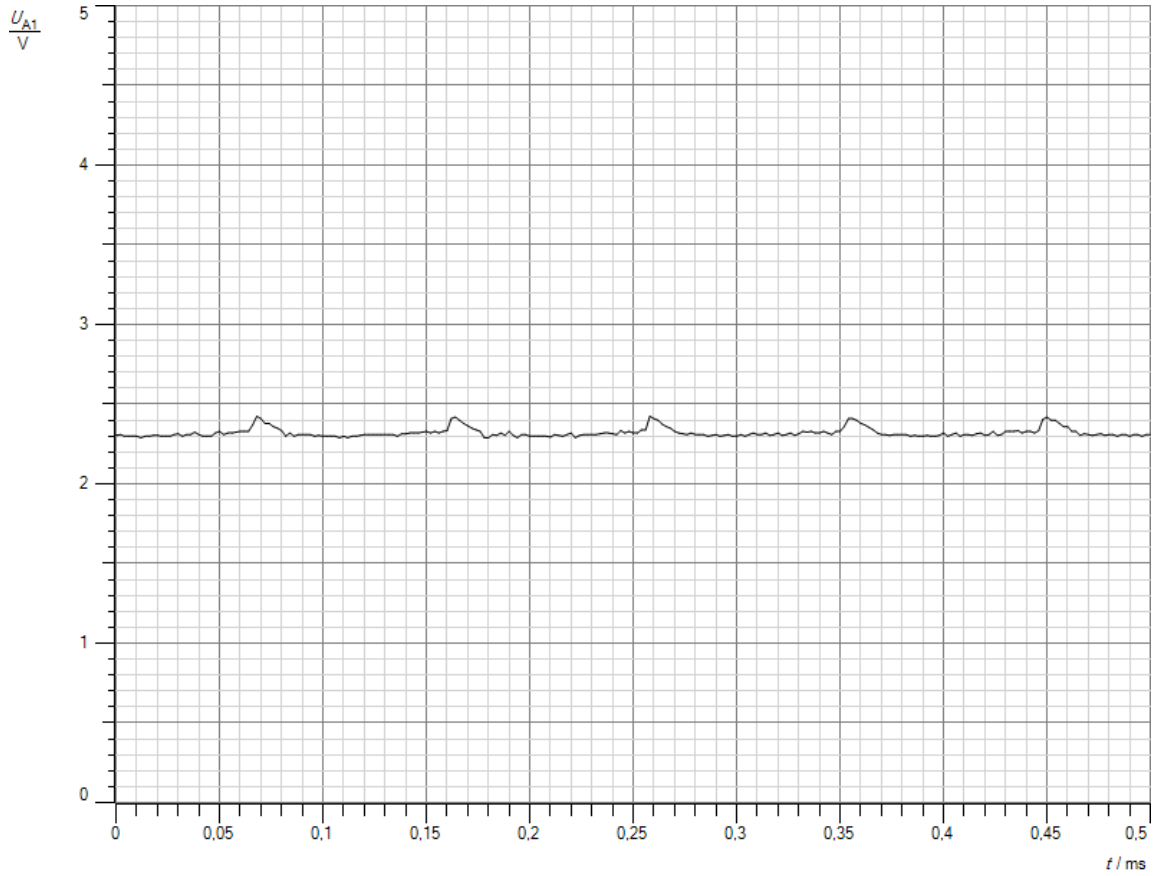


Abb.2g: Ausgangsspannung mit Kondensator und aufgedrehtem Trimmer

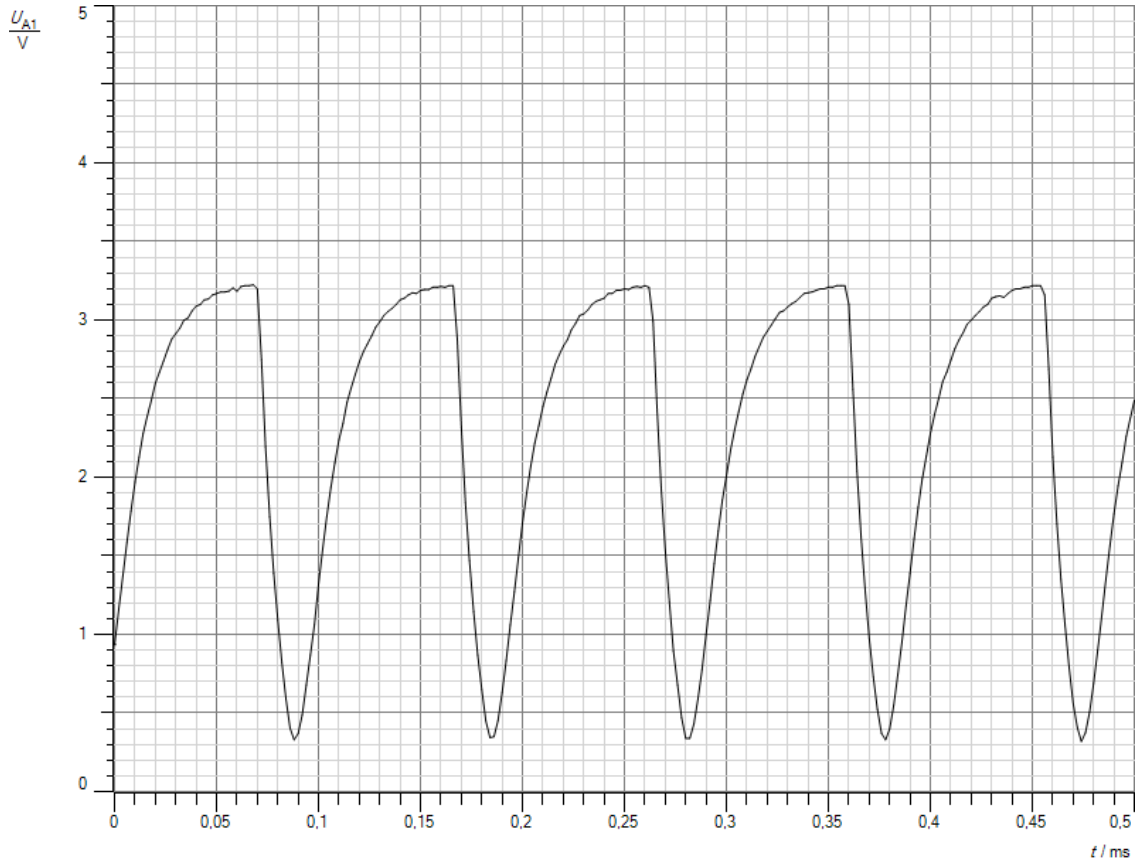


Abb.2g: Ausgangsspannung ohne Kondensator und aufgedrehtem Trimmer

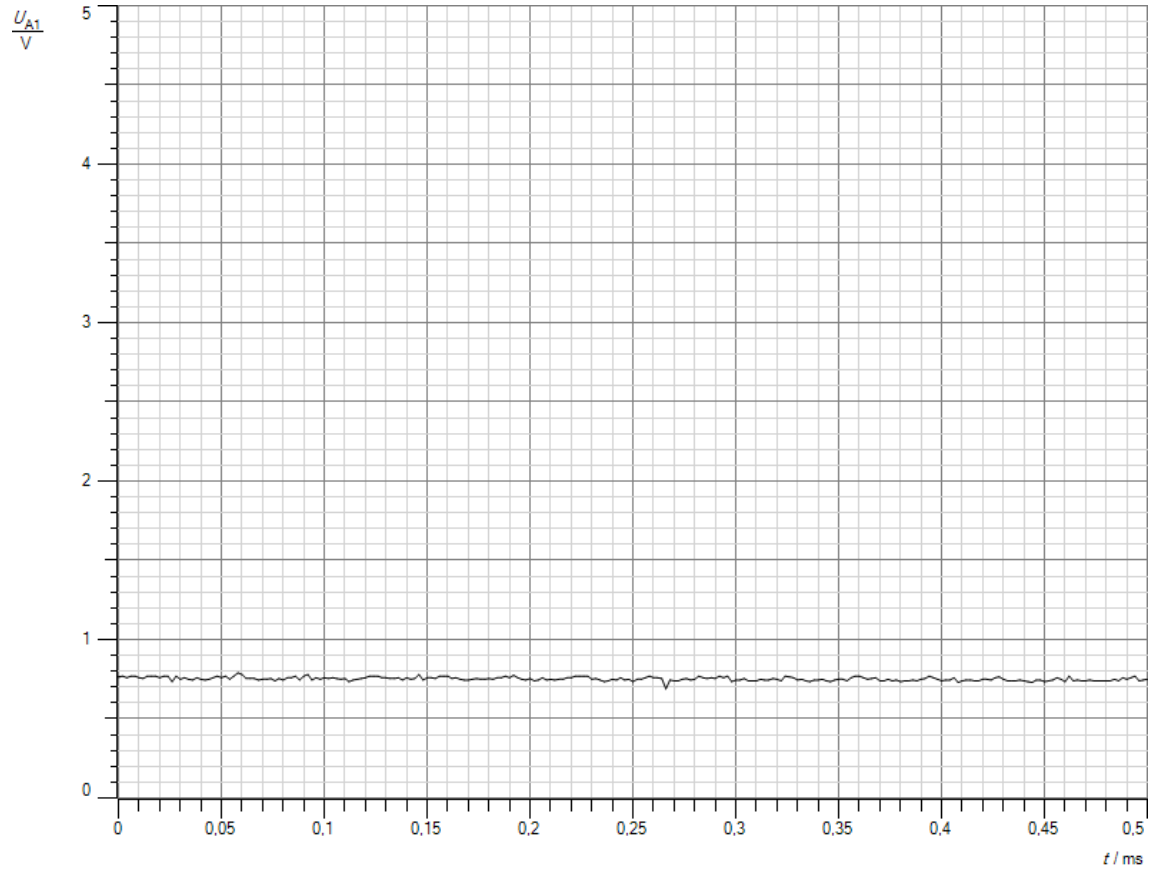


Abb.2i: Ausgangsspannung mit Kondensator und zugedrehtem Trimmer

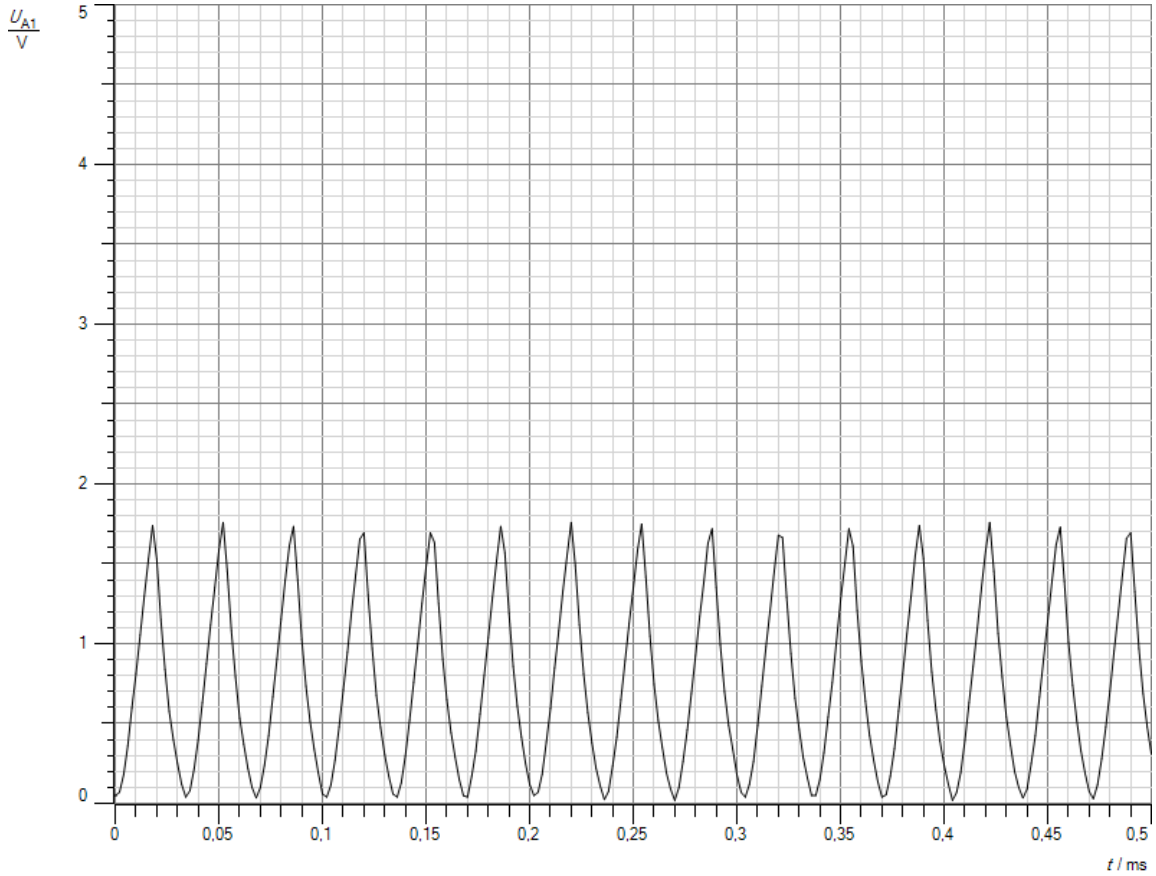


Abb.2i: Ausgangsspannung ohne Kondensator und zugedrehtem Trimmer

3.13 Aufwärtsregler

Versuch 1a:

Durchführung:

Man baut die Schaltung nach Abb. 1 mit einer weißen LED ohne den Widerstand R = 470 Ω auf und schaltet alle Geräte ein. Die Spannungsquelle am Eingang der Schaltung sollte eine stabilisierte Gleichspannung von U = 1,5 liefern. Man kann auch eine Batterie des Typs AA verwenden. Als Rechteckgenerator MV benutzt man den Multivibrator nach Abb. 2 aus Kapitel 3.1.1 mit $R_1 = R_2 = 10$ kΩ, der ebenfalls an die Spannungsquelle angeschlossen wird. Man misst mit cassy mobile oder einem Digitalmultimeter nacheinander die beiden Spannungen U_e und U_a und ebenso die beiden Ströme I_e und I_a.

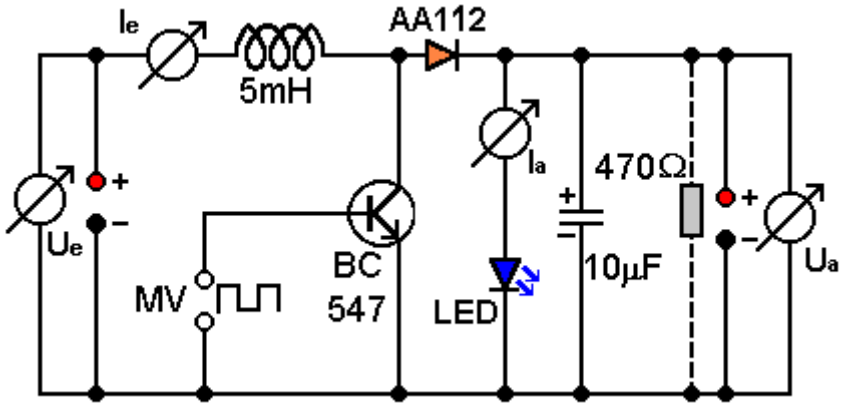


Abb.1: Versuchsaufbau Aufwärtsregler

Beobachtung:

Die LED leuchtet, obwohl sie eine Spannung von mindestens U = 2,5 V benötigt und die Betriebsspannung nur U = 1,5 V beträgt. Man erhält folgende Messwerte:

$$U_e = 1{,}5\ V$$
$$U_a = 2{,}82\ V$$
$$I_e = 12{,}6\ mA$$
$$I_a = 3{,}7\ mA.$$

Auswertung:

Damit ergeben sich für die Ein- und Ausgangsleistungen folgende Werte:

$$P_e = U_e * I_e = 1{,}5V * 12{,}6mA = 18{,}9mW$$
$$P_a = U_a * I_a = 2{,}82V * 3{,}7mA = 10{,}4mW$$

und für den Wirkungsgrad η

$$\eta = \frac{P_a}{P_e} * 100\% = \frac{10{,}4mW}{18{,}9mW} * 100\% = 55{,}2\%.$$

Der Wirkungsgrad der Schaltung ist etwas geringer als der von professionellen Aufwärtsreglern. Die Verlustleistung des Multivibrators beträgt wegen der geringeren Betriebsspannung nur etwa $P_M = 3{,}5$ mW und fällt wesentlich weniger ins Gewicht als beim Aufwärtsregler nach Versuch 1a aus Kapitel 3.1.2. Rechnet man sie heraus, so ergibt sich ein Wirkungsgrad von $\eta = 67{,}5\%$, durchaus vergleichbar mit dem von käuflichen LED-Treibern (s. Kapitel 3.2).

Versuch 1b:

Durchführung:

Man benutzt den gleichen Versuchsaufbau wie in Versuch 1a, ersetzt aber die LED durch den Widerstand R = 470 Ω. Man zeichnet den Spannungsverlauf am Messwiderstand mit cassy mobile mit und ohne Kondensator auf. An cassy mobile wählt man als Messzeit t = 500 µs bei einer Auflösung von Δt = 2µs.

Beobachtung:

Man erhält die Messkurven in Abb. 2a und 2b.

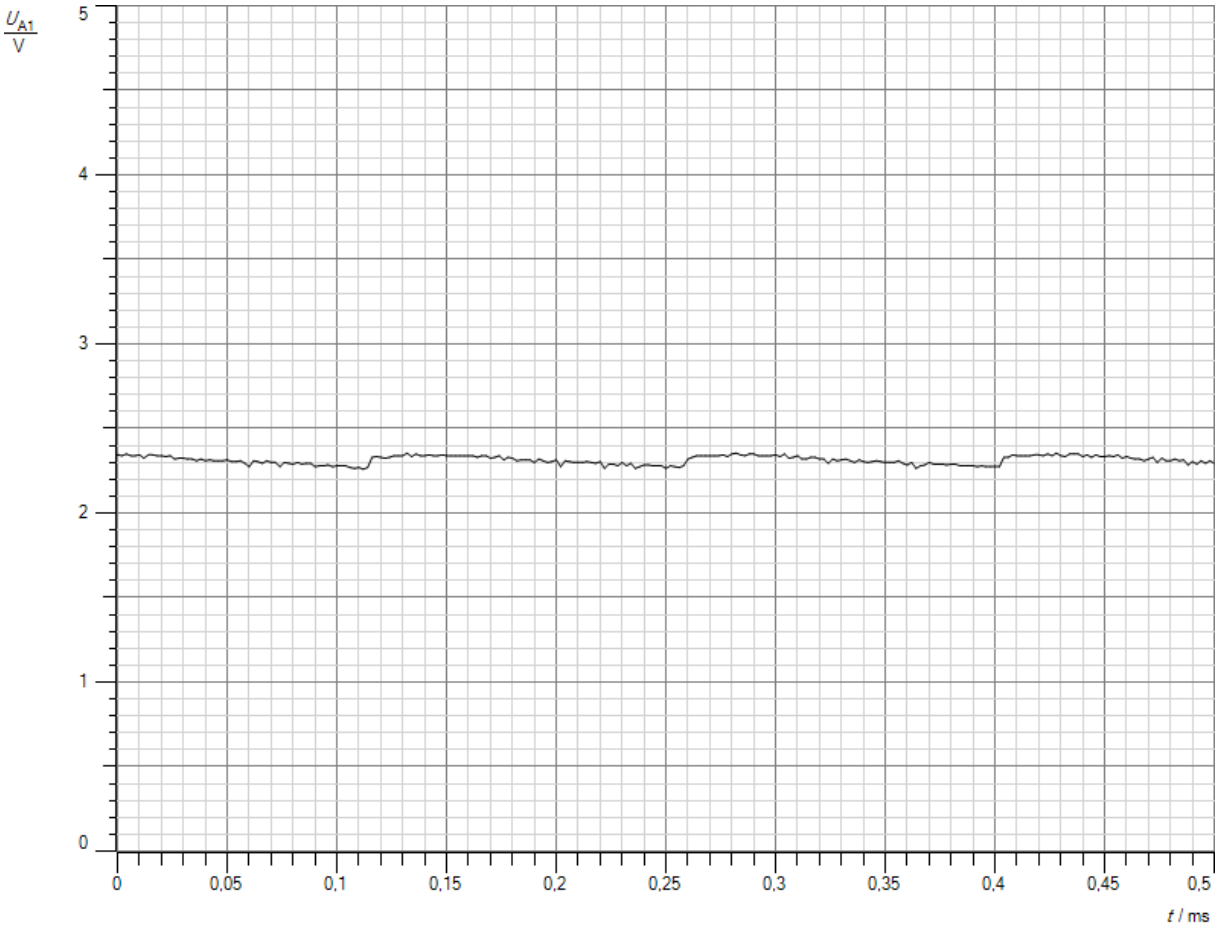


Abb. 2a: Ausgangsspannung mit Kondensator

Ergebnis:

Die Kurven bestätigen die Überlegungen zur Funktionsweise eines Aufwärtsreglers. Während der Einschaltzeit der Spule baut sich in ihr ein Magnetfeld auf. Am Messwiderstand beträgt die Spannung in dieser Zeit ohne Kondensator U = 0 V. Mit Kondensator sinkt die Spannung nur leicht. Er hält den Strom durch die LED bzw. den Widerstand aufrecht. Während der Ausschaltzeit der Spule bricht das Magnetfeld zusammen und erzeugt einen hohen Spannungsstoß, der den Kondensator neu auflädt.

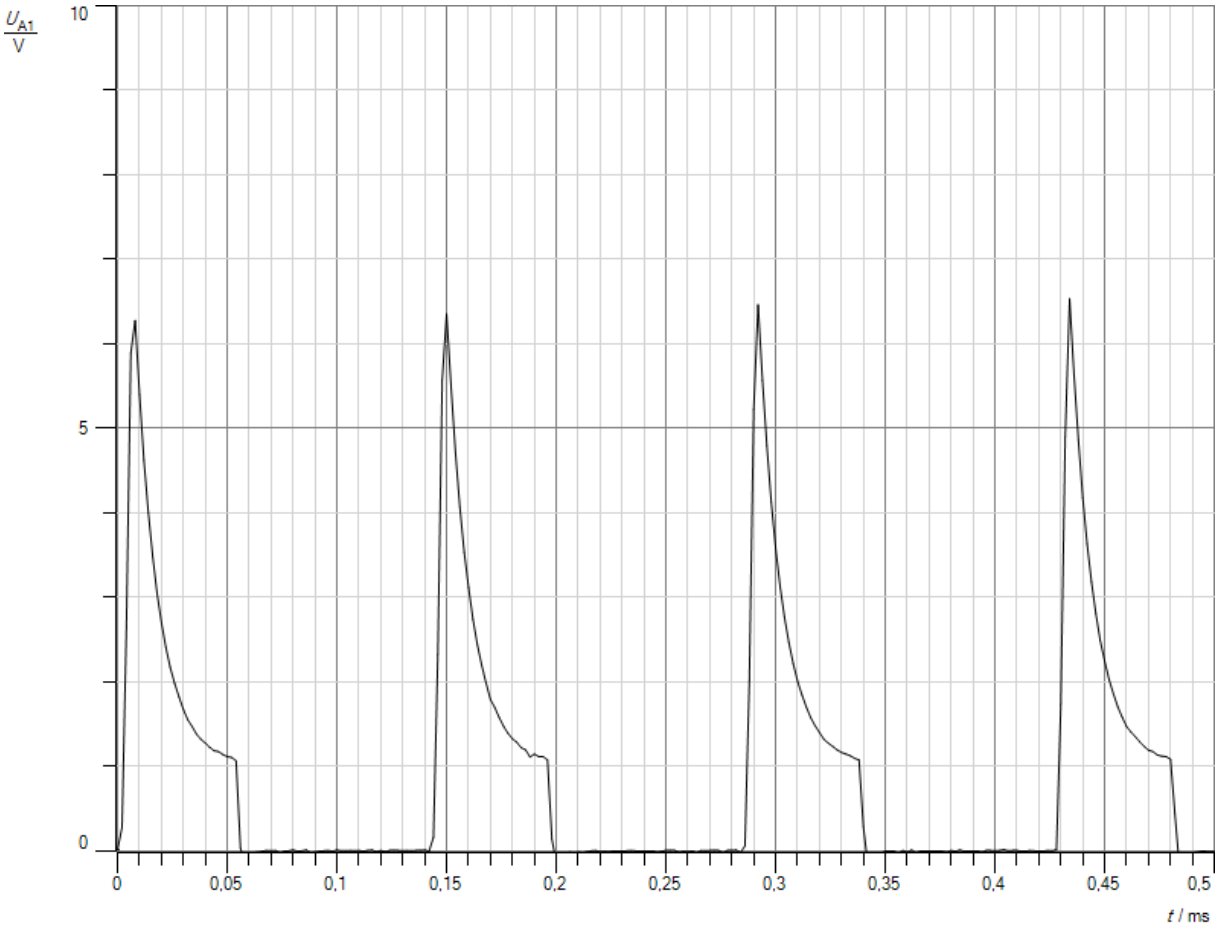


Abb. 2b: Ausgangsspannung ohne Kondensator

Auch beim Aufwärtsregler lässt sich die Ausgangsleistung durch unsymmetrische Beschaltung der Basen der beiden Transistoren T_1 und T_2 des Multivibrators erhöhen.

Versuch 1c:
Durchführung:
Man benutzt den gleichen Versuchsaufbau wie in Versuch 1a mit R_1 = 4,7 kΩ und R_2 = 15 kΩ an den Basen der Transistoren T_1 und T_2 des Multivibrators.
Beobachtung:
Die weiße LED leuchtet wesentlich heller als in Versuch 1a. Man erhält folgende Messwerte:

$$U_e = 1{,}5\ V$$
$$U_a = 2{,}98\ V$$
$$I_e = 31{,}4\ mA$$
$$I_a = 9{,}3\ mA.$$

Auswertung:
Die LED wird fast mit ihren optimalen Werten U = 3 V und I = 10 mA betrieben. Für die Ein- und Ausgangsleistungen ergeben sich folgende Werte:

$$P_e = U_e * I_e = 1{,}5V * 31{,}4mA = 47{,}1mW$$
$$P_a = U_a * I_a = 2{,}98V * 9{,}3mA = 27{,}7mW$$

und für den Wirkungsgrad η

$$\eta = \frac{P_a}{P_e} * 100\% = \frac{27{,}7mW}{47{,}1mW} * 100\% = 58{,}8\%.$$

Der Wirkungsgrad der Schaltung ist etwa gleichgeblieben. Da die Verlustleistung des Multivibrators konstant bleibt, fällt sie weniger ins Gewicht. Rechnet man die Verlustleistung des Multivibrators mit P_M = 3,5 mW heraus, so ergibt sich ein Wirkungsgrad η = 63,5 %.

Versuch 1d:

Durchführung:

Man benutzt den gleichen Versuchsaufbau wie in Versuch 1c, ersetzt aber die LED durch den Widerstand R = 470 Ω. Man zeichnet den Spannungsverlauf am Messwiderstand mit cassy mobile mit und ohne Kondensator auf. An cassy mobile wählt man als Messzeit t = 500 µs bei einer Auflösung von Δt = 2µs.

Beobachtung:

Man erhält die Messkurven in Abb. 2c und 2d.

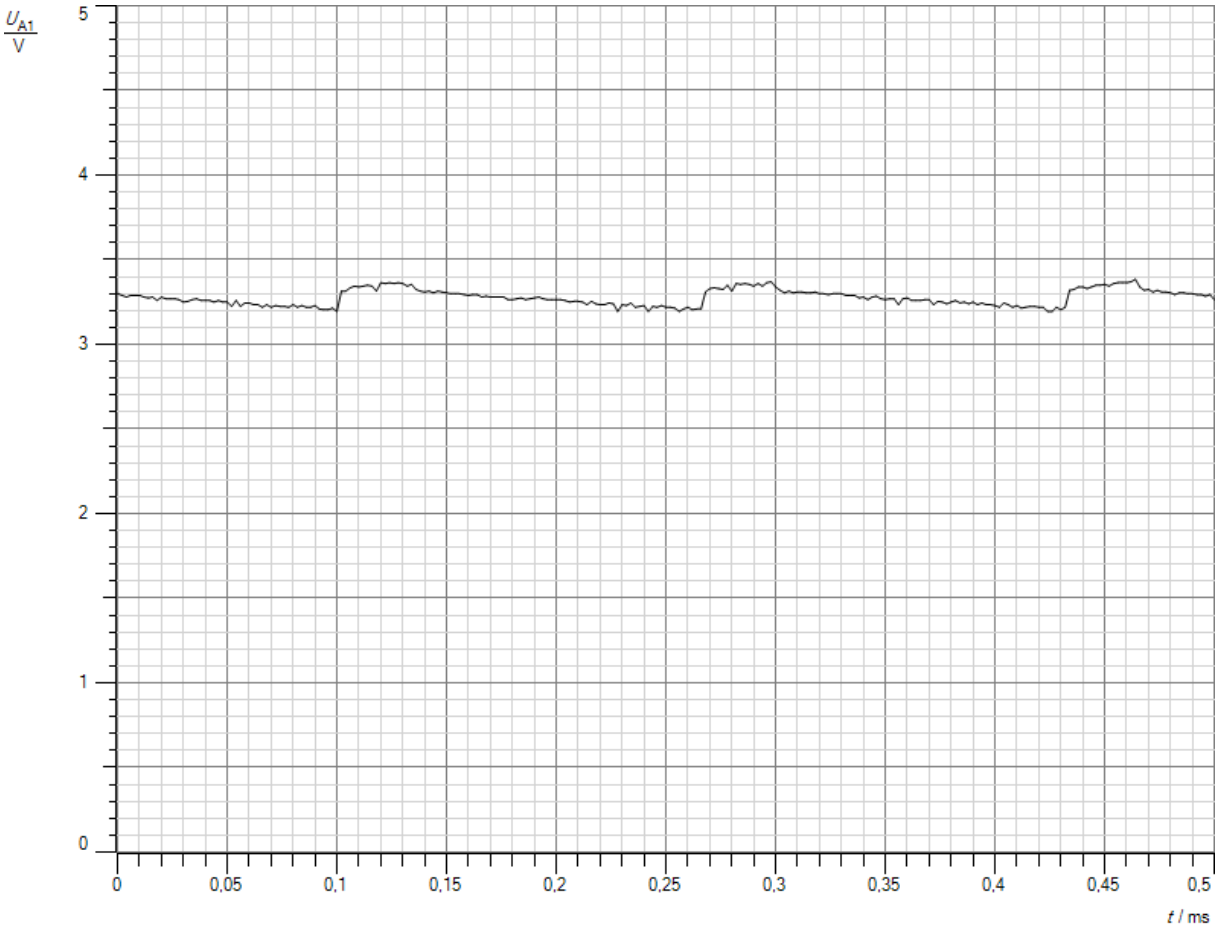


Abb. 2c: Ausgangsspannung mit Kondensator

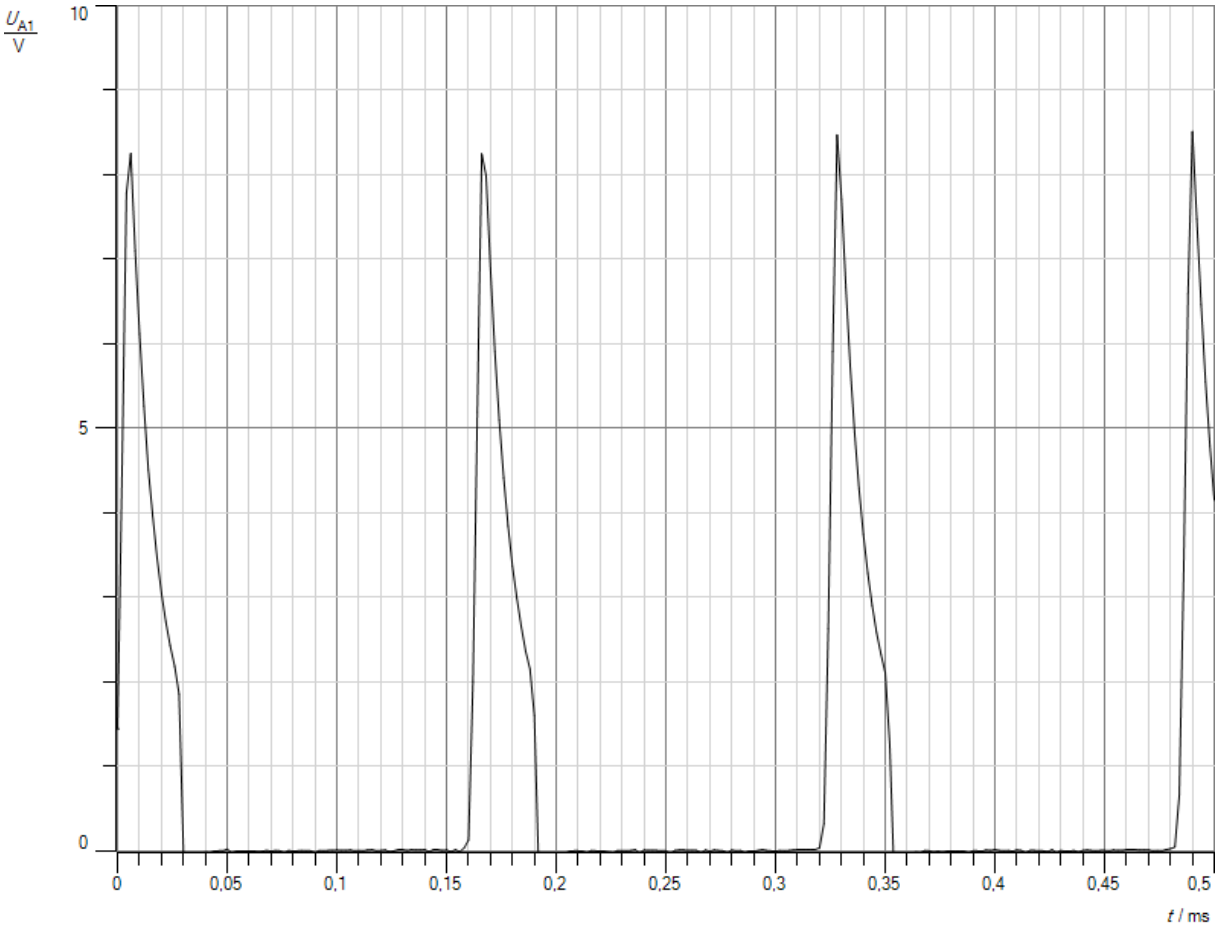


Abb. 2d: Ausgangsspannung ohne Kondensator

Ergebnis:
Die Kurven bestätigen die Überlegungen. Die Ausschaltzeit der Spule wurde deutlich verkürzt, die Einschaltzeit verlängert. Es wird mehr Energie in der Spule gespeichert. Gleichzeitig ist die Spitzenspannung in den Ausschaltphasen größer, da die Selbstinduktionsspannung wegen der kürzeren Abschaltzeit zunimmt. Die Ausgangsspannung am Kondensator steigt von U_1 = 2,35 V auf U_2 = 3,3 V.

Man kann die Ausgangsleistung des Abwärtsreglers auch durch Rückkopplung steigern, wie die folgenden Versuche zeigen.

Versuch 1e:
Durchführung:
Man benutzt den gleichen Versuchsaufbau wie in Versuch 1a mit R_1 = 10 kΩ und R_2 = 10 kΩ an den Basen der beiden Transistoren des Multivibrators. Man legt den Basiswiderstand von T_2 jedoch nicht an die Betriebsspannung, sondern an den Ausgang der Spule des Reglers.
Beobachtung:
Die LED leuchtet deutlich heller als in Versuch 1a, aber etwas weniger hell als in Versuch 1c. Man erhält folgende Messwerte:

$$U_e = 1{,}5\ V$$
$$U_a = 2{,}91\ V$$

$I_e = 27{,}5\ mA$
$I_a = 7{,}2\ mA.$

Auswertung:
Für die Ein- und Ausgangsleistungen ergeben sich folgende Werte:

$$P_e = U_e * I_e = 1{,}5V * 27{,}5mA = 41{,}3mW$$
$$P_a = U_a * I_a = 2{,}91V * 7{,}2mA = 20{,}9mW$$

und für den Wirkungsgrad η

$$\eta = \frac{P_a}{P_e} * 100\% = \frac{20{,}9mW}{41{,}3mW} * 100\% = 50{,}6\%.$$

Berücksichtigt man die Verlustleistung des Multivibrators mit P_M = 3,5 mW bei U = 1,5 V, so ergibt sich ein Wirkungsgrad von η = 55,3%.

<u>Versuch 1f:</u>
Durchführung:
Man benutzt den gleichen Versuchsaufbau wie in Versuch 1e, ersetzt aber die LED durch den Widerstand R = 470 Ω. Man zeichnet den Spannungsverlauf am Messwiderstand mit cassy mobile mit und ohne Kondensator auf. An cassy mobile wählt man als Messzeit t = 500 µs bei einer Auflösung von Δt = 2µs.

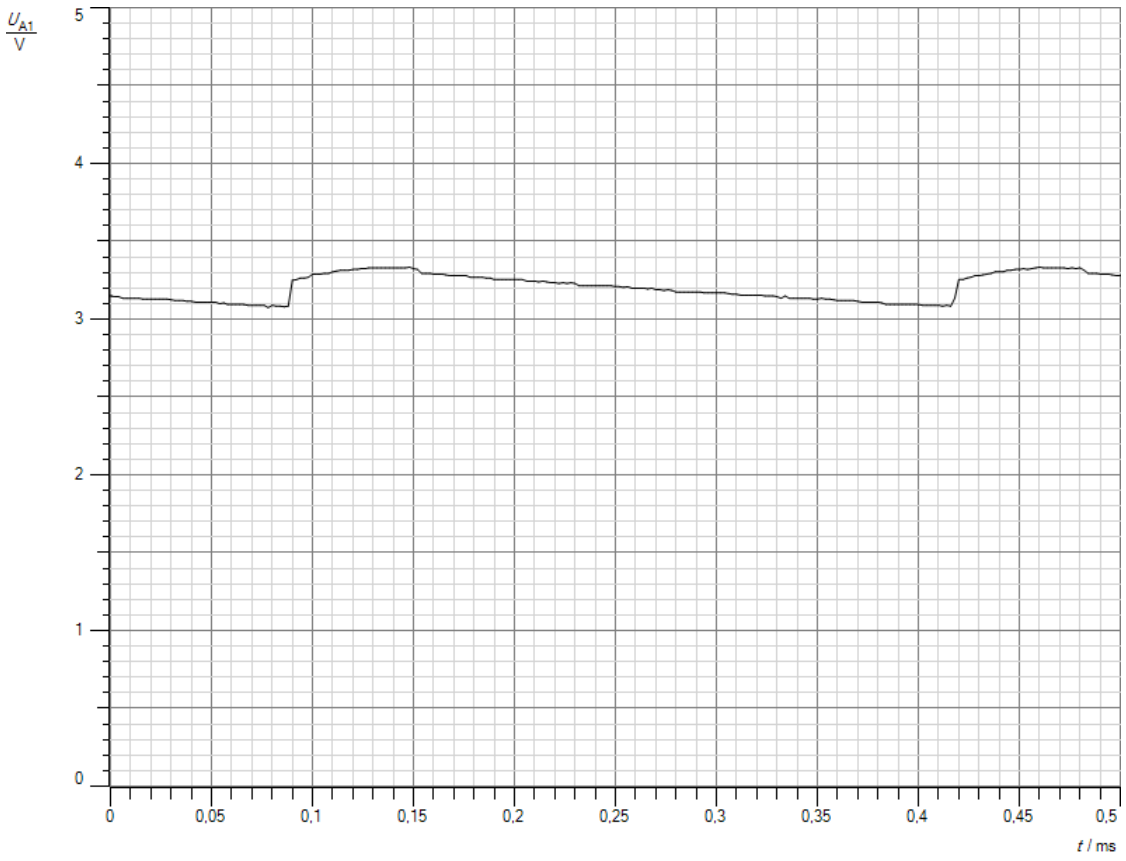


Abb. 2e: Ausgangsspannung mit Kondensator

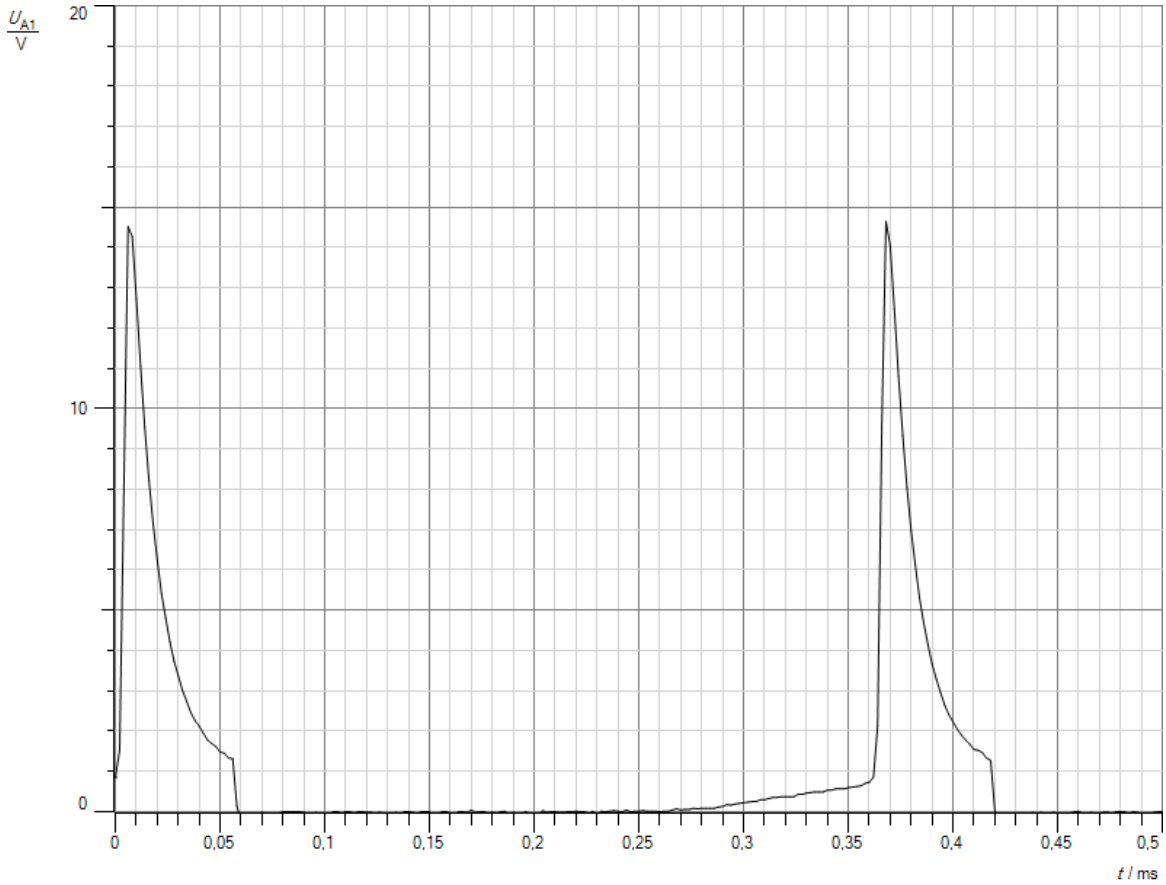


Abb. 2f: Ausgangsspannung ohne Kondensator

Beobachtung:
Man erhält die Messkurven in Abb. 2e und 2f.
Ergebnis:
Durch die Rückkopplung bleibt die Ausschaltzeit der Spule erstaunlicherweise beim Aufwärtsregler gleich, die Einschaltzeit verlängert sich jedoch auf etwa das Vierfache im Vergleich zu Versuch 1b, die Frequenz sinkt auf weniger als die Hälfte. Andererseits schnellt die Spitzenspannung von U_1 = 6,3 V auf U_2 = 14,5 V hoch. In der Spule wird mehr Energie gespeichert. Die Ausgangsspannung am Kondensator steigt von U_1 = 2,35 V auf U_2 = 3,25 V.
Man kann die Helligkeit der LED dimmen, wenn man den Basiswiderstand R_2 an T_2 des Multivibrators als Reihenschaltung aus einem Festwiderstand R_{21} und einem Trimmer R_{22} ausführt.

Versuch 1g:
Durchführung:
Man benutzt den gleichen Versuchsaufbau wie in Versuch 1a mit R_1 = 2,2 kΩ und R_2 als Reihenschaltung aus einem Festwiderstand R_{21} = 2,2 kΩ und einem Trimmer R_{22} = 10 kΩ an den Basen der beiden Transistoren T_1 und T_2 des Multivibrators. Man dreht den Trimmer voll auf bzw. zu und misst jeweils die Spannung an der LED.
Beobachtung:
Die LED leuchtet hell, wenn man den Trimmer voll aufgedreht und nur schwach, wenn er zugedreht ist. Die Spannung an der LED liegt zwischen U_1 = 2,57 V und U_2 = 2,97 V.
Erklärung:
Ist der Trimmer zu, so wird die Spule nur für kurze Zeit eingeschaltet. Sie speichert wenig

Energie. Dreht man den Trimmer auf, so verlängert sich die Einschaltzeit der Spule. Sie nimmt mehr Energie auf. Die Entladespannungen werden höher und damit die Spannung am Kondensator. Allerdings sinken mit steigendem Basiswiderstand die Frequenz und damit die Zahl der Impulse pro Sekunde. Daher kann man den Wert des Trimmers nicht beliebig erhöhen. Dass diese Überlegungen richtig sind, zeigt der folgende Versuch.

Versuch 1h:

Durchführung:

Man benutzt den gleichen Versuchsaufbau wie in Versuch 1g, ersetzt aber die LED durch den Widerstand R = 470 Ω. Man zeichnet den Spannungsverlauf am Messwiderstand mit cassy mobile mit und ohne Kondensator auf. An cassy mobile wählt man als Messzeit t = 500 µs bei einer Auflösung von Δt = 2µs.

Beobachtung:

Man erhält die Messkurven in Abb. 2g bis 2j.

Folgerung:

Die Kurven bestätigen die Überlegungen aus Versuch 1g.

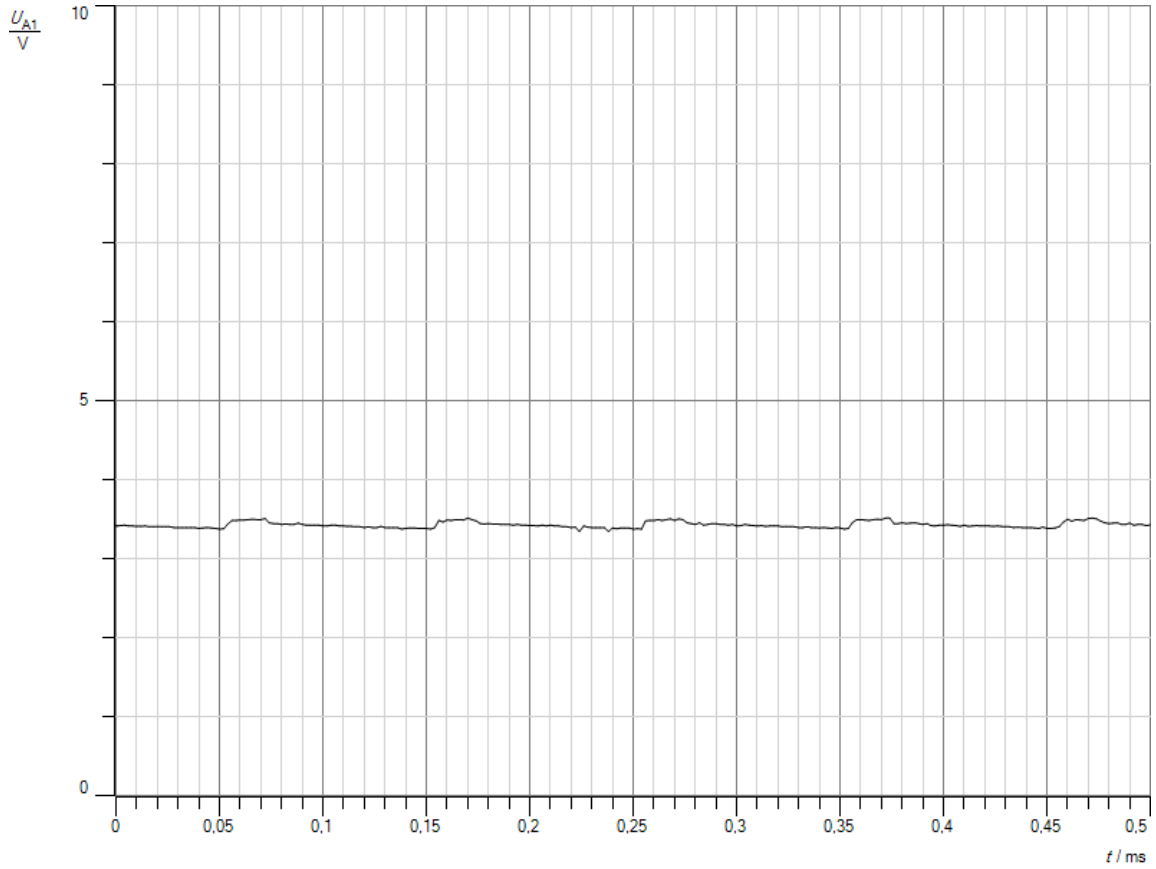


Abb.2g: Ausgangsspannung mit Kondensator mit aufgedrehtem Trimmer

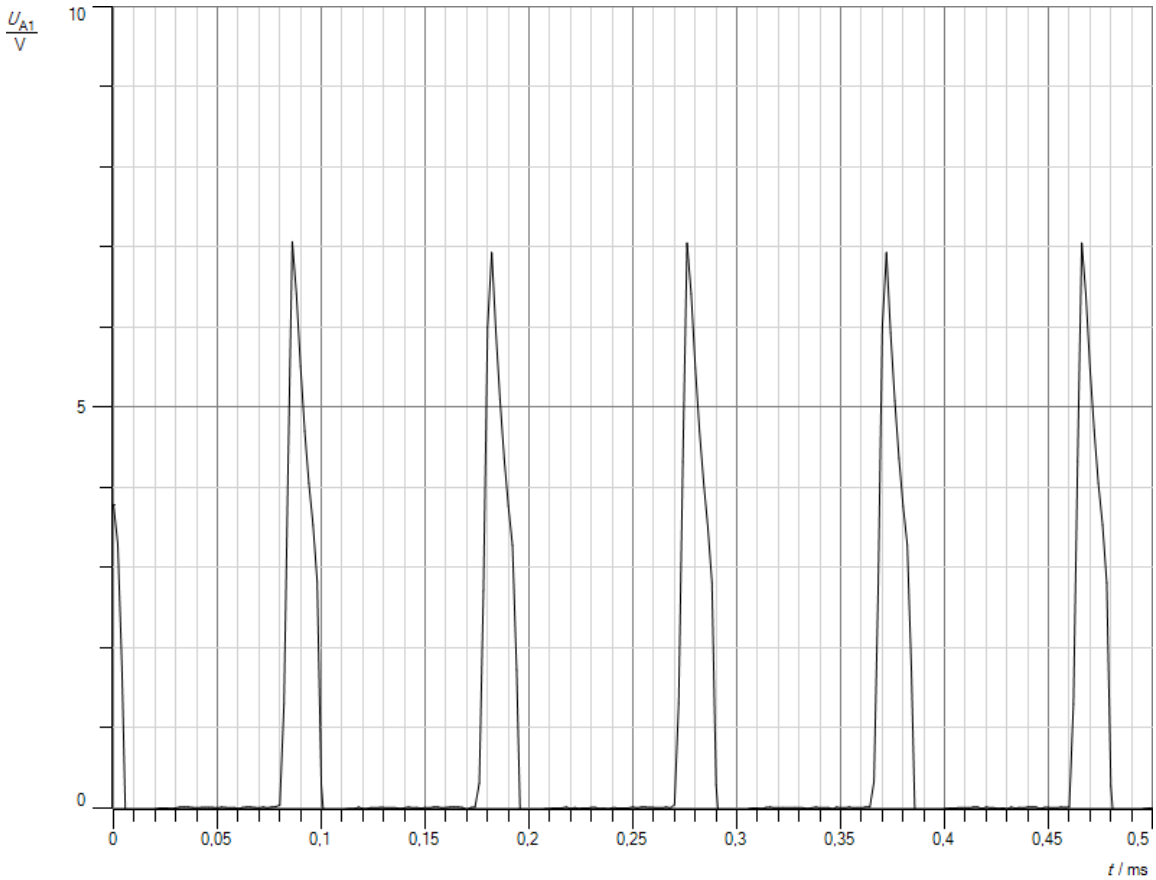


Abb.2h: Ausgangsspannung ohne Kondensator mit aufgedrehtem Trimmer

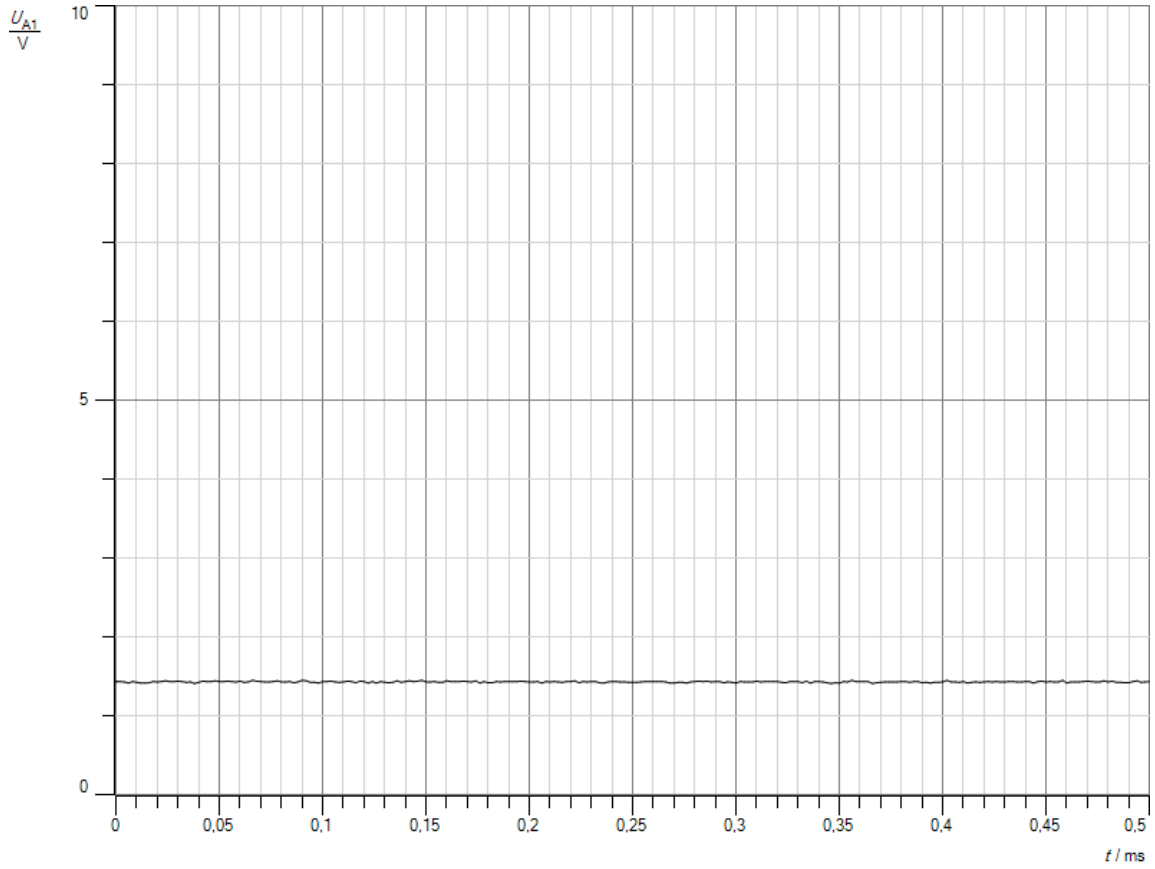


Abb.2i: Ausgangsspannung mit Kondensator mit zugedrehtem Trimmer

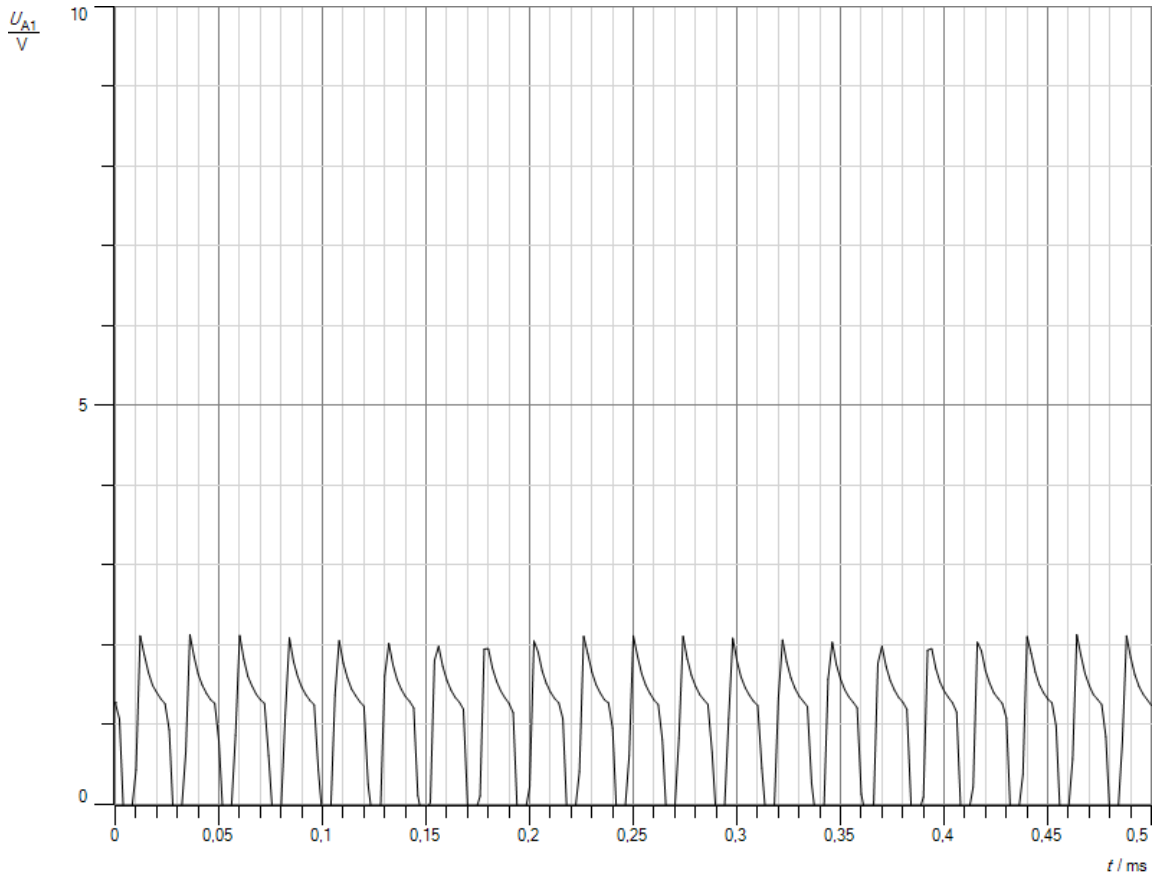


Abb.2j: Ausgangsspannung ohne Kondensator mit zugedrehtem Trimmer

3.2 Konkrete Regler

3.2.1 Regler 7809

Inzwischen gibt es Schaltregler in integrierter Form, 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%. Abb.1 zeigt die Pinbelegung eines solchen Reglers für eine Ausgangsspannung U_A = 9V.

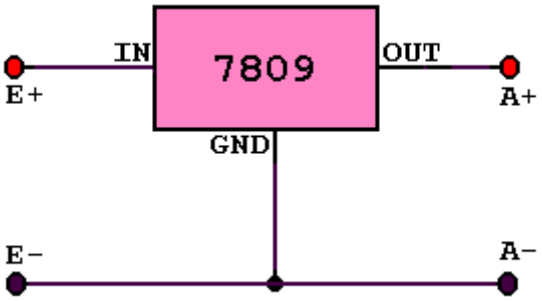


Abb.1: Schaltregler 7809

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.

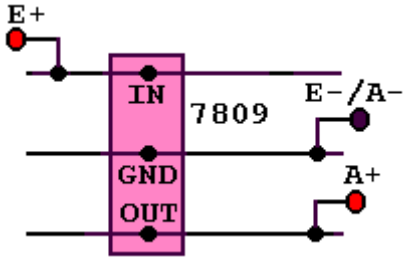


Abb.2: Verschaltung auf einer Lochrasterplatine

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.

<u>Versuch 1:</u>

Aufbau:

Man schließt an den Eingang ein handelsübliches Netzteil mit U = 12 V und I = 500 mA an. An den Ausgang legt man ein Voltmeter, ein Amperemeter und ein Trimmpotentiometer R_L mit einer Leistung P = 10 W. Amperemeter und Potentiometer werden in Reihe geschaltet,

das Voltmeter parallel zum Ausgang. Mit zwei weiteren Volt- bzw. Amperemetern überwacht man den Eingangsstrom I_e und die Eingangsspannung U_e am Regler.

Durchführung:

Man stellt mit dem Potentiometer R_L verschiedene Ausgangströme I_a ein und zwar in Schritten von 0,1 A und liest die zugehörigen 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]	η[%]
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

Messtabelle

Das Picoscope zeichnet die Kurven in Abb.3 auf.

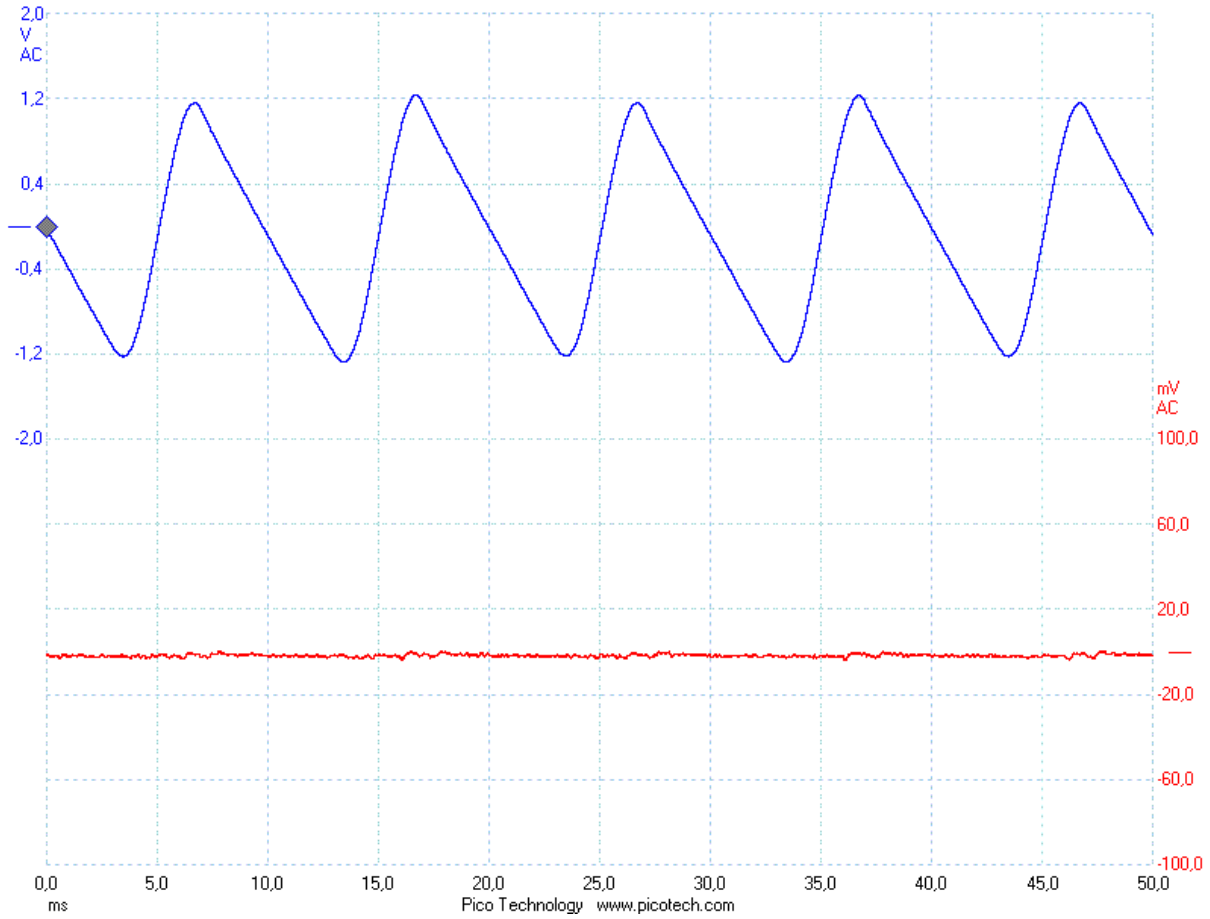


Abb.3: Welligkeit des Eingangs- und Ausgangsspannung

Aus der oberen Kurve liest man bei einem Ausgangsstrom von I_a = 0,3 A eine Eingangswelligkeit ΔU_e = 2,4 V und aus der unteren Kurve eine Ausgangswelligkeit von ΔU_a = 0 mV ab. Sie steigt am Eingang auf ΔU_e = 4,5 V und bleibt am Ausgang bei ΔU_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 zur Belastungsgrenze des Netzteiles von 0,5A nur um

$$Pr_a = \frac{(9{,}10V - 9{,}09V)}{9{,}10V} * 100\% = 0{,}11\%$$

während die Eingangsspannung um

$$Pr_e = \frac{(17{,}0V - 12{,}4V)}{17{,}0V} * 100\% = 27{,}1\%$$

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 mit C = 470 µF an, während beim Spannungsregler ein zusätzlicher Kondensator mit C = 1000 µF parallel zum Eingang eingelötet wurde. Dieser Eindruck täuscht. Streckt man die Zeitachse des Picoscopes in den µs-Bereich, so stellt man eine Welligkeit von ΔU = 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.

<u>Versuch 2:</u>

Aufbau:

Man ersetzt das Netzteil am Eingang des Reglers durch eine regelbare Gleichspannungsquelle. An den Ausgang legt man ein Voltmeter, ein Amperemeter und ein Trimmpotentiometer R_L mit einer Leistung P = 10 W. Amperemeter und Potentiometer werden in Reihe geschaltet, das Voltmeter parallel zum Ausgang. Mit zwei weiteren Volt- bzw. Amperemetern überwacht man den Eingangsstrom I_e und die Eingangsspannung U_e am Regler.

Durchführung:

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 = 20 V.

Ergebnis:

Man erhält untenstehende Messtabelle.

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 deutlich teurer als die vergleichbaren Spannungsregler.

I_e[A]	U_e[V]	I_a[A]	U_a[V]	P_e[W]	P_a[W]	η[%]
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

Versuch 3:

Aufbau:

Da die Schaltfrequenz am Rande des MW-Radiobereiches liegt, baut man einen Schwingkreis aus der MW-Spule mit n = 75 Windungen von Phywe und einem Drehkondensator mit C = 500 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 Kapazität und die Induktivität.

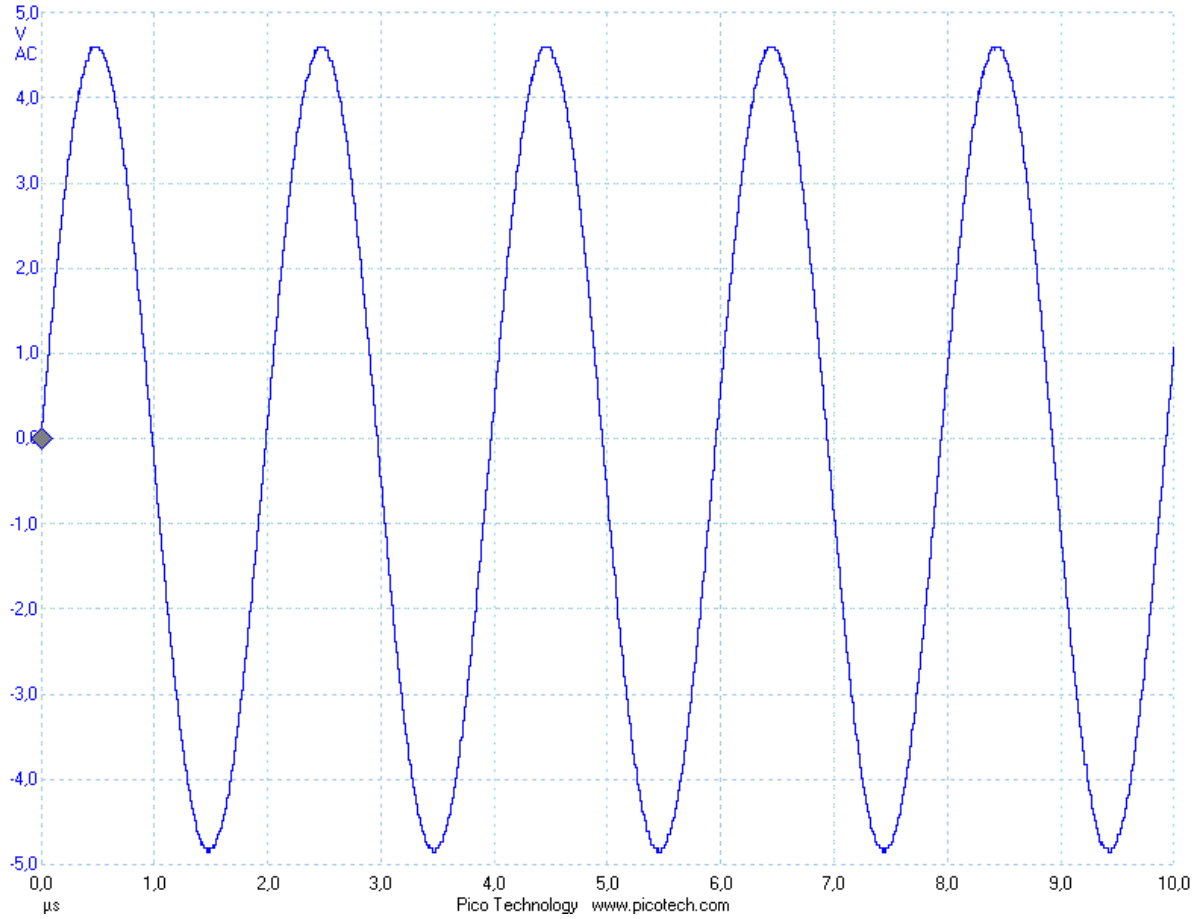


Abb.4: Schaltsignal des Schaltreglers 7809

Beobachtung:
Abb. 4 zeigt die Kurve des Picoscopes. Man erhält außerdem eine Kapazität C = 305 pF und eine Induktivität L = 326 µH.
Auswertung:
Aus der Kurve liest man eine Periodendauer von ungefähr T = 2 µs ab. Um einen genaueren Wert zu erhalten, berechnet man sie mit der Thomsonformel aus der Induktivität und der Kapazität. Es ergibt sich

$$T = 2\pi * \sqrt{L * C}$$
$$= 2\pi * \sqrt{3{,}05 * 10^{-10}F * 3{,}29 * 10^{-4}H}$$
$$= 1{,}98\mu s.$$

Damit beträgt die Schaltfrequenz

$$f = \frac{1}{T} = 505kHz.$$

Laut Datenblatt des Herstellers[3)] liegt sie zwischen 400 kHz und 600 kHz.

3.2.2 Regler MPL1

Speziell zum Betrieb von Hochleistungs-LEDs haben einige Hersteller Schaltregler entwickelt, die direkt an U_{eff} = 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-ICs LNK501[7)] 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[8)] vertrieben. Laut Datenblatt des LNK501[7)] besitzt der Schaltregler, auf dem der Konverter beruht, den grundsätzlichen Aufbau nach Abb.1.

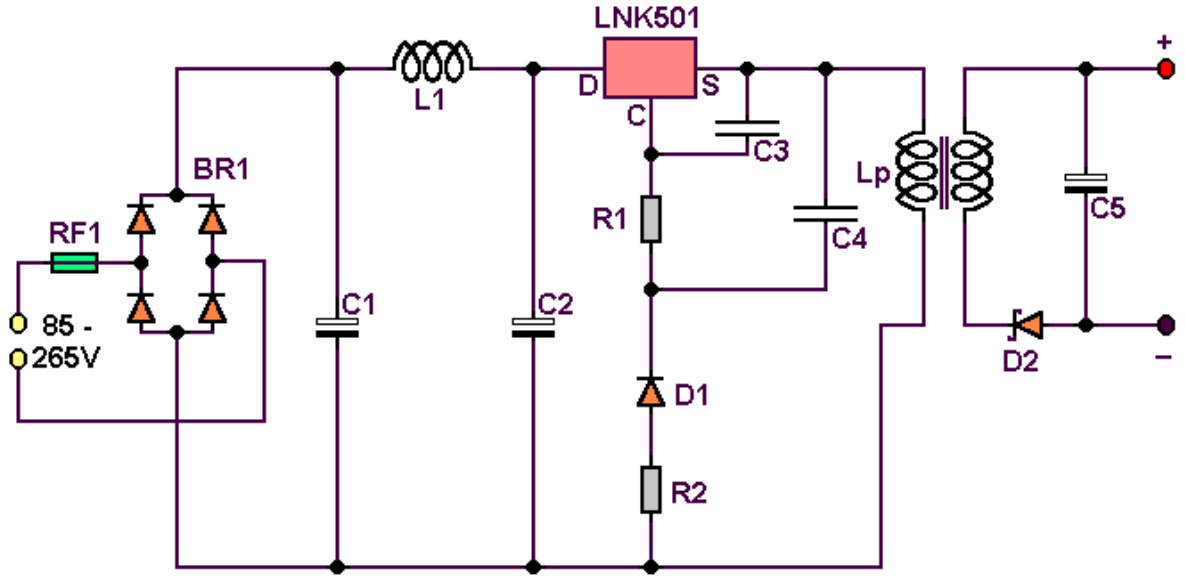


Abb.1: Schaltregler/Konverter

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. Er arbeitet im Normalbetrieb mit einer Frequenz f = 42 kHz und im Energiesparmodus mit f = 30 kHz. Dies wird in Versuch 2 gezeigt. Wird der Regler mit der Betriebsspannung verbunden, so lädt sich der Kondensator C_3 intern auf U = 5,6 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 Rückkopplungszweig 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 sorgt für diesen Strom während der Einschaltzeiten des Oszillators, in denen der Rückkopplungskreis sonst stromlos wäre, 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.

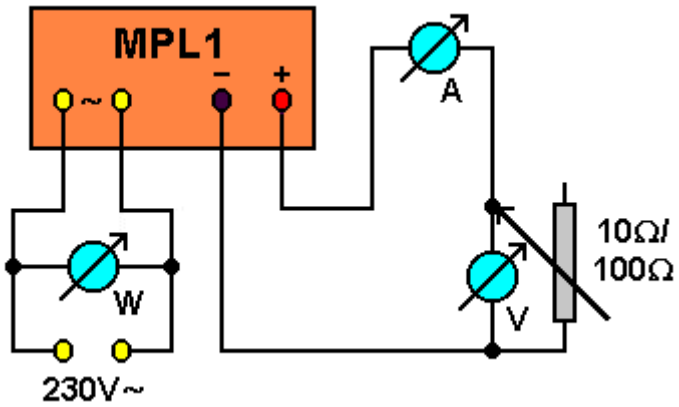


Abb.2: Versuchsaufbau U/I-Kennlinie des LED-Konverters

Versuch 1:

Durchführung:

Man baut die Schaltung nach Abb. 2 auf. Zunächst startet man mit voll aufgedrehtem 100Ω-Poti. Der Widerstand wird anschließend schrittweise reduziert. Für jeden Stopp notiert man sich die Spannung U, die Stromstärke I und die Leistung P_E in einer U/I/P-Tabelle. Dann ersetzt man das 100Ω-Poti durch ein 10Ω-Poti und führt die Reihe bis 0Ω 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_E[W]	P_A[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

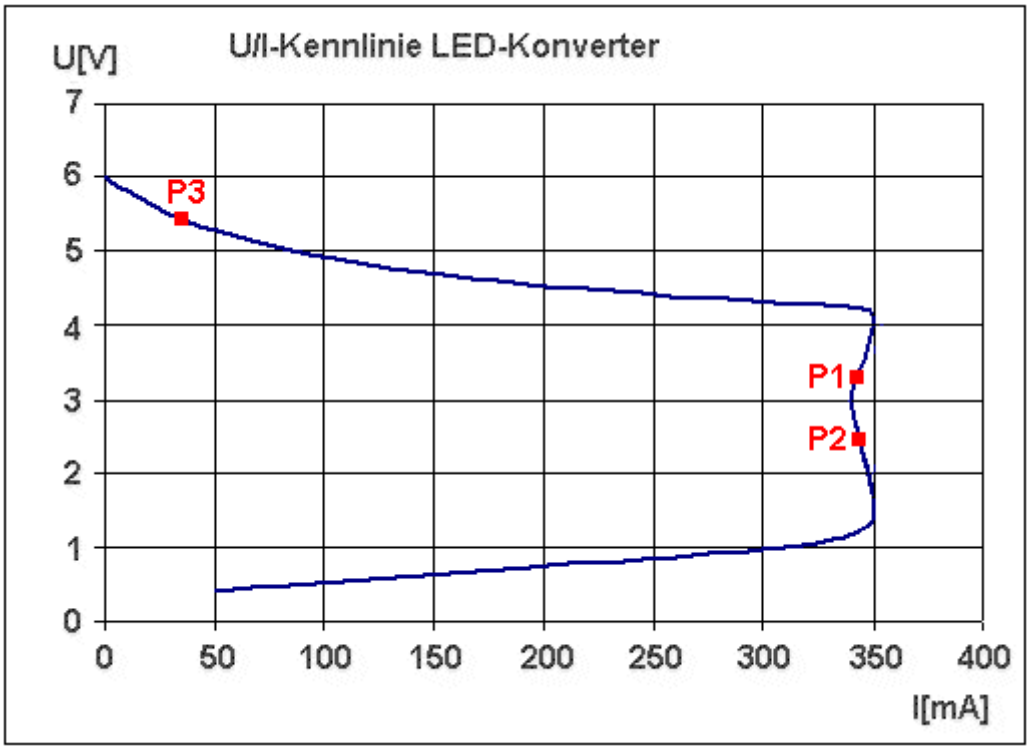


Abb.3: U/I-Kennlinie des LED-Konverters

Erklärung:[7)]

Ist die Ausgangsleistung P_A 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_C = 2,4 mA, der Ausgangstrom bei etwa I_A = 10 mA. I_C ist recht groß, da die Spannung im Sekundärkreis und damit auch im Primärkreis ihren Höchstwert erreicht. Nimmt die Ausgangsleistung zu, so geht der Regler bei einem Steuerstrom von I_C = 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 vergleichsweise 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 I_C = 2 mA. Reduziert man den Lastwiderstand weiter, so sinken die Ausgangspannung und der Steuerstrom ab. Erreicht er I_C = 1 mA, so schaltet der Regler ab und aktiviert die Einschaltautomatik. So ist die Schaltung vor Überlastung, möglicherweise auch verursacht durch einen Kurzschluss, geschützt. Die Einschaltautomatik versucht in diesem Zustand 300mal pro Sekunde, den Regler wieder im Normalmodus zu starten. Das gelingt, sobald die Überlastung beseitigt wurde. Vor allem der Konstantstrommodus ist für den LED-Betrieb bestens geeignet. Eine weiße LED mit einer Leistung von 1W besitzt laut Hersteller folgende Kenndaten:

$$U = 3{,}2V$$
$$I = 350mA$$

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 P = 1W gilt laut Hersteller:

$$U = 2{,}5V$$
$$I = 350mA$$

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 LEDs drastisch ab. Sie werden nur noch mit einem kleinen Teil ihrer vollen Leistung betrieben. Nachmessen lieferte für die Spannung und die Stromstärke:

$$U = 5{,}4V$$
$$I = 35mA$$

wobei für den optimalen Betrieb folgende Werte erforderlich gewesen wären:

$$U = 2 * 3{,}2V = 6{,}4V$$
$$I = 350mA.$$

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 LEDs gerade noch zum Leuchten bringt.

Laut Hersteller soll man an den Konverter nicht zwei rote LEDs 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 LEDs erhebliche Toleranzen aufweisen, könnten die LEDs 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)

$$P_A = 0{,}35A * 4{,}2V \\ = 1{,}47W$$

des Konverters eine Eingangsleistung

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

Damit erhält man einen Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{\mathrm{P_A}}{\mathrm{P_E}} * 100\% = 68{,}4\%.$$

Für alle anderen Punkte der Kennlinie ergeben sich ähnliche Werte, wie Sie der Tabelle 1 entnehmen können. Laut Datenblatt des LNK501[7)] 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 LEDs viel zu hohe Eingangsspannung zurück zu führen. Das macht einen Überträger erforderlich, der den Wirkungsgrad erheblich senkt.

In den folgenden Versuchen wird die Schaltfrequenz des Reglers überprüft.

Versuch 2a:
Aufbau:
Man lötet sich einen Schwingkreis aus einer Induktivität L = 68 mH und einem Kondensator C = 200 pF zusammen. Man schließt ihn an cassy an. Als Messzeit wählt man t = 200 µs bei einer Auflösung Δt = 2µs.
Durchführung:
Man legt die Spule auf das Gehäuse des Schaltreglers, schließt ihn an die Steckdose an und startet cassy. Es stoppt automatisch nach Ende der Messzeit. Man speichert die Kurve und ermittelt aus ihr die Periodendauer.
Beobachtung:
Man erhält die Messkurve in Abb.1.
Ergebnis:
Aus der Kurve ergibt sich eine Periodendauer T = 24 µs. Für die Schaltfrequenz f folgt daraus

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2{,}4 * 10^{-5} s} = 41{,}7 kHz,$$

in guter Übereinstimmung mit den Angaben des Herstellers. Aus den Daten der Bauteile berechnet man mit der Thomsonschen Schwingungsformel die Periodendauer T zu

$$\begin{aligned} T &= 2\pi\sqrt{* L * C} \\ &= 2\pi * \sqrt{68 * 10^{-3} H * 200 * 10^{-12} F} \\ &= 23{,}2 \mu s. \end{aligned}$$

Gemessener und theoretischer Wert stimmen sehr gut überein.

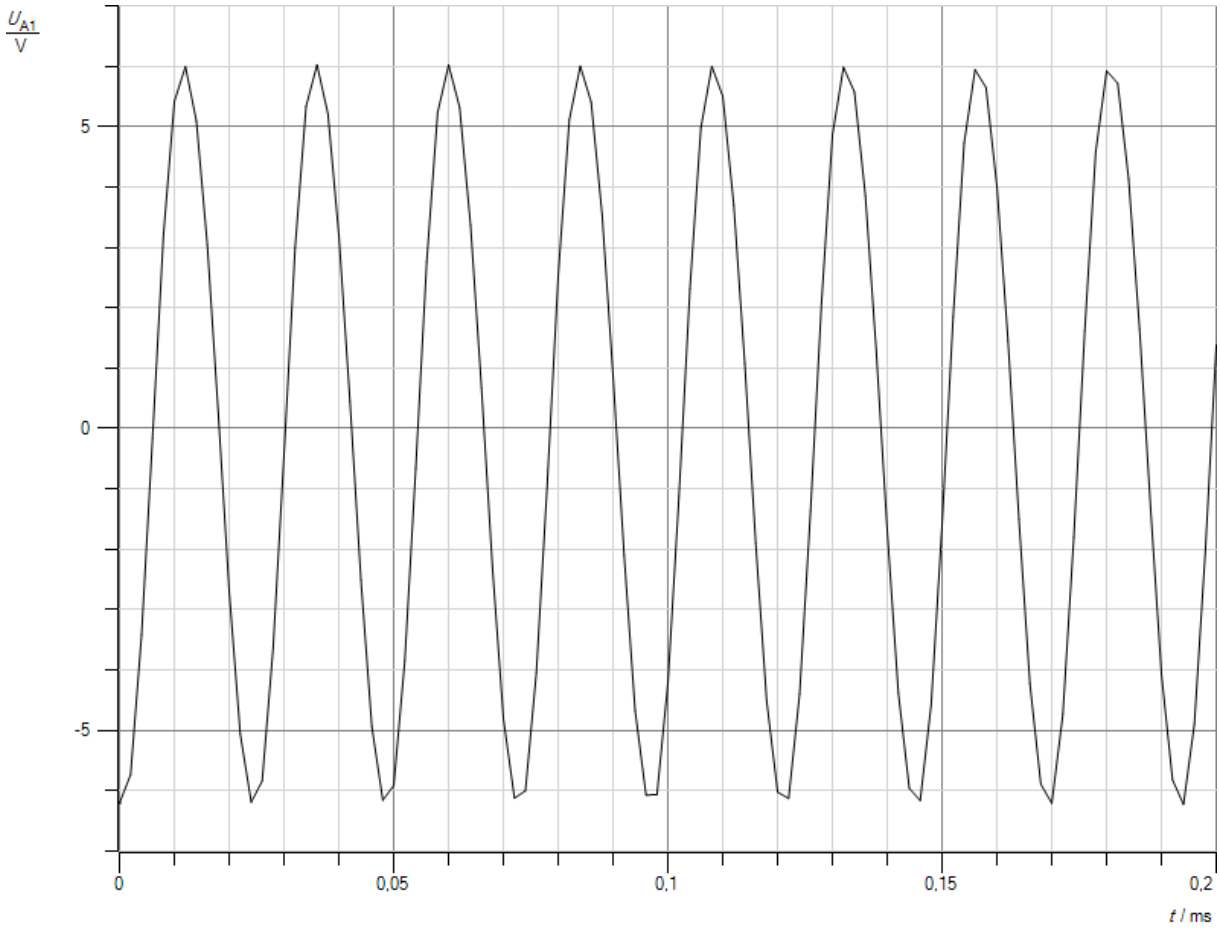


Abb.1: Messkurve

Versuch 2b:
Aufbau:
Man schließt den Schwingkreis an ein Digitalmultimeter mit Frequenzfunktion an.
Durchführung:
Man legt die Spule auf das Gehäuse des Schaltreglers, schließt ihn an die Steckdose an und startet das Digitalmultimeter. Nachdem sich die Anzeige stabilisiert hat, liest man die Frequenz ab.
Beobachtung:
Man erhält für die Schaltfrequenz f = 41,5 kHz.

Folgerung:
Beide Messungen liefern fast das gleiche Ergebnis. Die geringen Abweichungen sind auf Ungenauigkeiten der Messgeräte und die Toleranzen der Bauteile des Schwingkreises zurückzuführen.

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

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

und einer Ausgangsleistung pro Kreis von

$$P_A = 0{,}35A * 27V = 9{,}45W$$

einen Wirkungsgrad von

$$\eta = \frac{9{,}45W}{12{,}1W} * 100\% = 78\%.$$

Er ist ebenfalls für Netzbetrieb ausgelegt.

Andere integrierte Schaltungen sind für niedrigere Eingangsgleichspannungen konzipiert. Dadurch steigt der Wirkungsgrad. Die Firma recom-international 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 LEDs zu je 1W Leistung gleichzeitig betreiben und dimmen. Die Betriebsspannung sollte an die Zahl der LEDs angepasst werden, um die Verluste möglichst gering zu halten. Man benötigt U = 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 U_1 = 0 V und U_2 = 4,5 V anliegt. Dann werden die LEDs von dunkel bis hell durchgesteuert. Weitere Informationen entnehmen Sie dem Datenblatt.[6)]

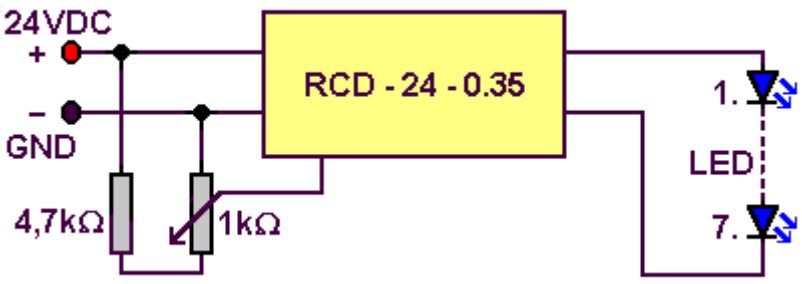


Abb.4: LED-Konverter RCD-24-0.35

3.2.3 Regler LT1073

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 U = 1 V – 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.[5)] Wegen der integrierten Bauweise sind die Schaltwege kurz. Die Verluste werden geringer, der Wirkungsgrad steigt laut Hersteller bis auf 97%. Die Verschaltung auf einer Lochrasterplatine zeigt Abb. 2.

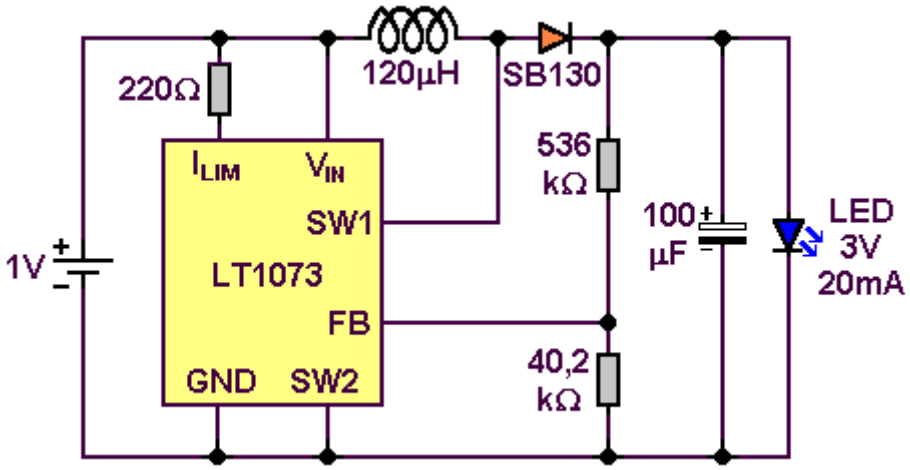


Abb.1: Aufwärtsregler LT1073

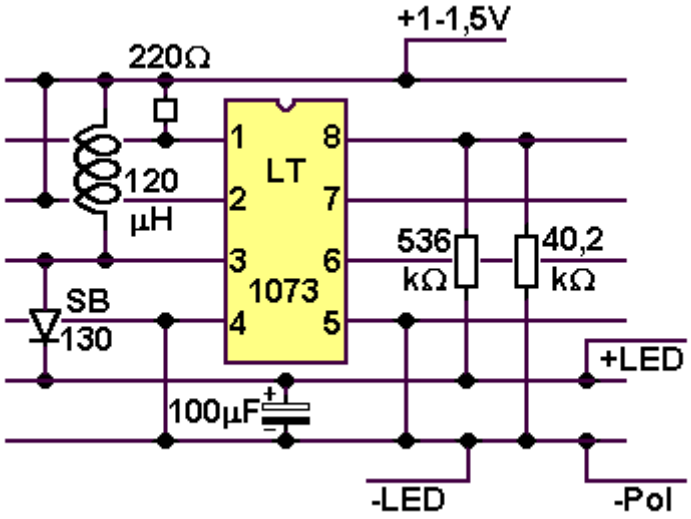


Abb.2: Verschaltung auf einer Lochrasterplatine

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 Holzschräubchen
2 Holzleisten 10x10x40mm
1 Ferrero-Rocher-Dose
Lötmaterial
Patex

Zunächst befestigt man die fertig verlötete Platine mit den Schräubchen 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 8mm-Loch in den Deckel der Dose, für den Mikroschalter ein 6mm-Loch. Man verschraubt die Teile am Deckel. Man setzt die LED ein und verbindet die einzelnen Teile mit Schaltlitze 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.

3.2.3 Spezialtreiber

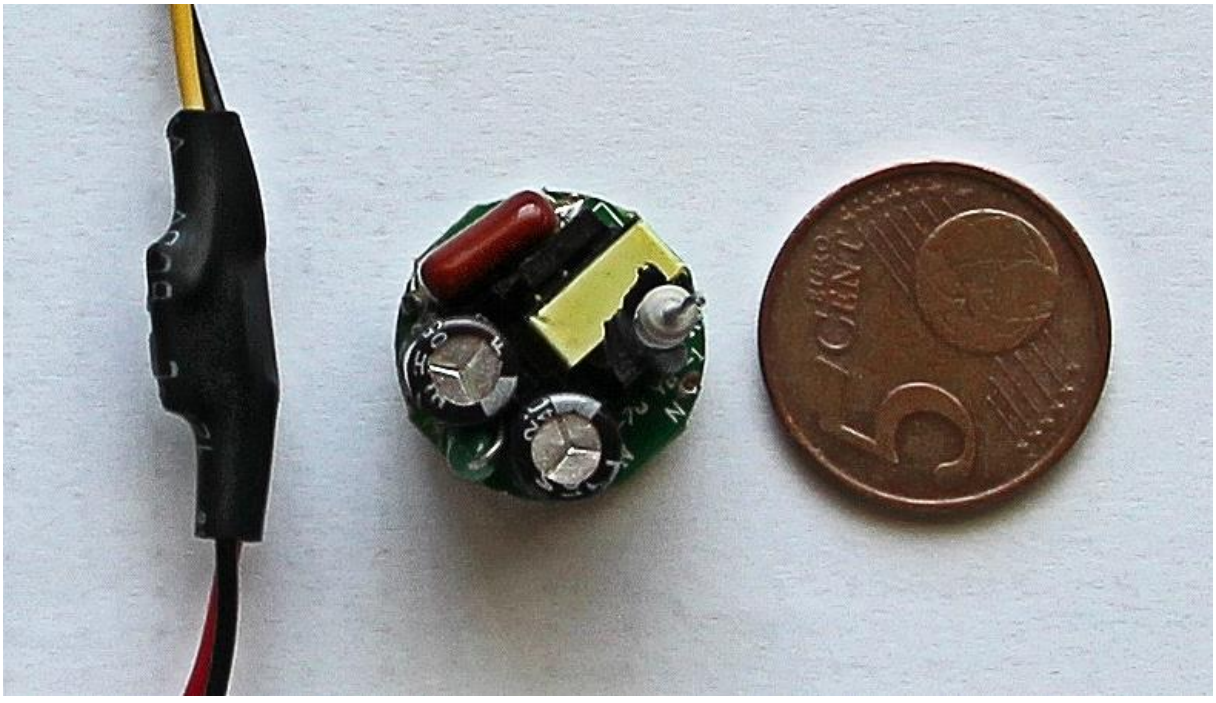


Abb.1: LED-Treiber für weiße LEDs

Die Elektronic-Firma Conrad bietet zwei Treiber für weiße LEDs an, die sehr klein sind und in eine LED-Taschenlampe passen. Der erste liefert einen Ausgangsstrom I = 20 mA, der zweite I = 10 mA bei einer Eingangsspannung U = 1 - 1, 9V. Mit ihnen kann man eine weiße LED mit einer Batterie des Typs AA betreiben. Abb. 1 zeigt , dass ihe Größe vergleichbar mit einer 5-

Cent-Münze ist. Aber auch Treiber für LED-Lampen, die am Netz betrieben werden, sind nicht mehr größer, wie man in der Mitte der Abb. 1 sehen kann. Die Vorderseite der Platine ist mit diskreten Bauteilen bestückt, mit Kondensatoren, Widerständen, einem kleinen Trafo usw. Auf der Rückseite befindet sich der Gleichrichter und die Schaltelektronik in SMD-Technik für zwölf LEDs ebenfalls in SMD-Technik, die auf einer eigenen Platine kreisförmig untergebracht sind. Der Treiber passt in den Sockel einer 6-W-LED-Lampe, vergleichbar einer herkömmlichen 40-W-Lampe. Das Verhalten des Treibers für den Batteriebetrieb lässt sich mit einem Superkondensator als Stromquelle und einer weißen LED genauer untersuchen, wie die folgenden Versuche zeigen. An dem Treiber für den Netzbetrieb kann man im geöffneten Zustand aus Sicherheitsgründen keine Messungen durchführen, da er mit U = 230 V betrieben werden muss. Aber die Schülerinnen und Schüler sind sehr beeindruckt, wie viel Elektronik im Sockel einer LED-Lampe steckt.

Versuch 1:

Aufbau

Im ersten Versuch werden mit cassy mobile der Strom und die Spannung am Eingang des Reglers aufgezeichnet. Abb. 2 zeigt den benötigten Aufbau des Versuches.

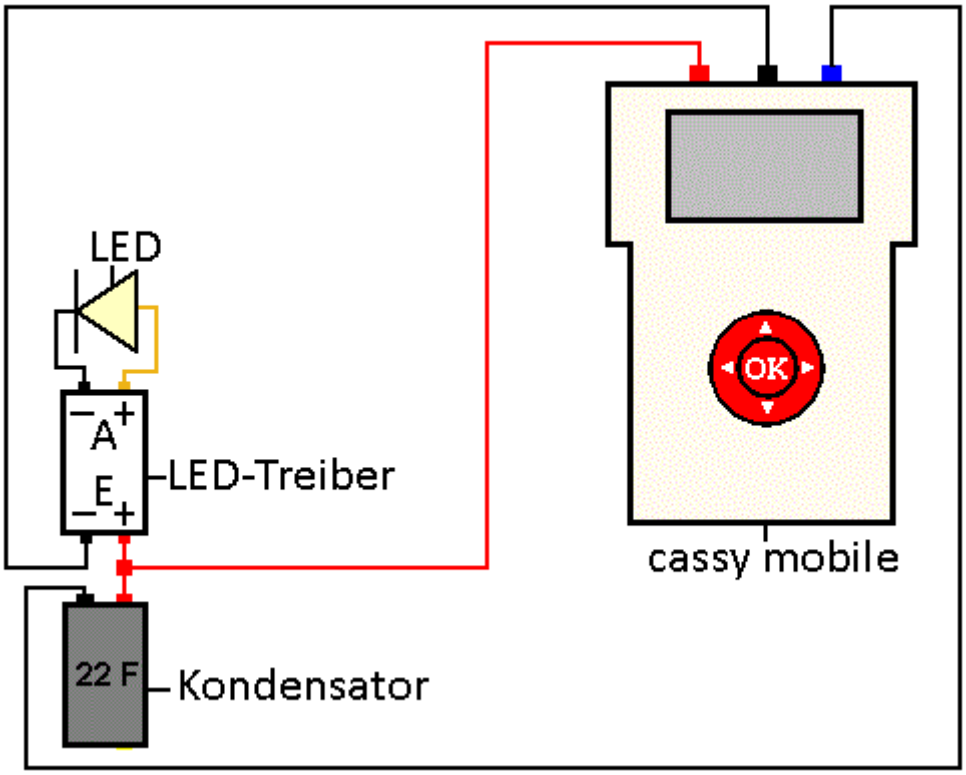


Abb. 2: Versuchsaufbau

Das schwarze Kabel des Treiberausganges A- verbindet man mit dem Minuspol, der Kathode der LED, das gelbe A+ mit dem Pluspol, der Anode. An der LED ist das lange Beinchen der Pluspol, die Anode, und das kurze Beinchen der Minuspol, die Kathode.

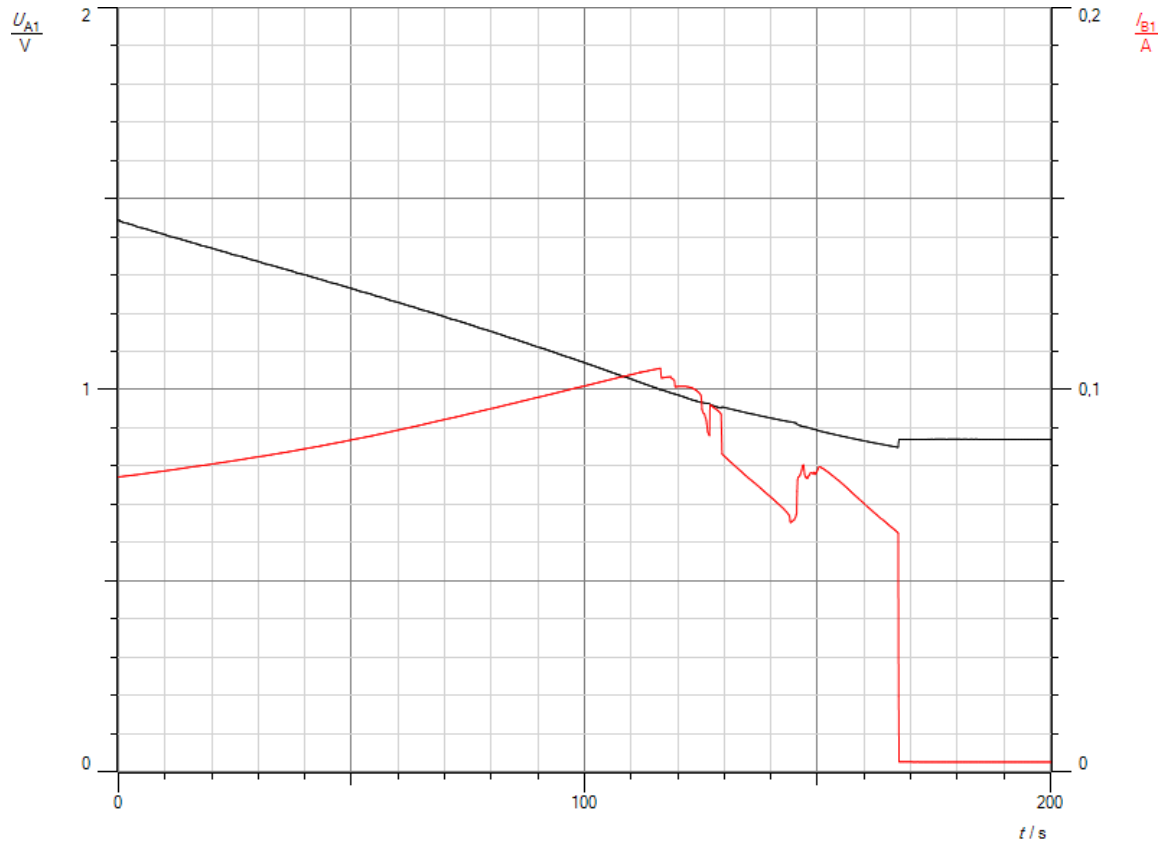
Durchführung

Man lädt den Superkondensator an einer stabilisierten Gleichspannungsspannungsquelle auf U = 1, 5 V auf. Man trennt ihn von der Spannungsquelle und verbindet das rote Kabel, den Pluspol des Treibereinganges E+ einerseits mit dem Pluspol des Kondensators und

andererseits mit der roten Spannungsbuchse von cassy mobile. Das schwarze Kabel E- schließt man an die schwarze Erdungsbuchse von cassy mobile an. Außerdem verbindet man den Minuspol des Kondensators mit der blauen Strombuchse von cassy mobile. Man startet cassy mobile. Man stoppt die Messung einige Sekunden, nachdem die LED erloschen ist.

Beobachtung

Man erhält z.B. folgende Messkurve:



Messkurve 2: Spannungs- und Stromverlauf am Treibereingang

Auswertung

Die Spannung am Kondensator sinkt im Zeitraum t = 0 - 120 s von U_1 = 1,44 V auf U_2 = 1 V, da er sich nach und nach entlädt. Die Stromstärke dagegen steigt von I_1 = 77 mA auf I_2 =105 mA. Danach fällt sie in Stufen. Die Helligkeit der LED sinkt. Nach etwa t = 165 s schaltet sich der Treiber von alleine aus, die LED erlischt. Man erhält zu verschiedenen Zeitpunkten t folgende Spannungen U_E, Stromstärken I_E und Leistungen P_E:

t[s]	U_E[V]	I_E[A]	P_E[W]
0,7	1,44	0,0773	0,111
20,3	1,37	0,0806	0,110
40,6	1,299	0,0847	0,110
60,2	1,228	0,0895	0,110
80,5	1,151	0,0952	0,110
100,1	1,070	0,1010	0,108

Tabelle 1: Messwerte

Die sinkende Eingangsspannung U_E wird durch eine steigende Eingangsstromstärke I_E kompensiert, so dass die Eingangsleistung P_E und damit die Helligkeit der LED am Ausgang der Schaltung konstant bleiben. Im Zeitraum t = 0,7 – 100,1 s sinkt die Spannung um

$$\Delta U = 1{,}44V - 1{,}07V = 0{,}37V.$$

Die mittlere Stromstärke in diesem Zeittraum ermittelt man mit cassy mobile graphisch aus der I(t)-Kurve. Sie beträgt:

$$I_E = 0{,}08773A.$$

Damit besitzt der Kondensator eine Kapazität

$$C = \frac{Q_E}{\Delta U_E} = \frac{I_E * \Delta t}{\Delta U_E} = \frac{0{,}08773A * 99{,}4s}{0{,}37V} = 23{,}6F.$$

Dieser Wert stimmt im Rahmen der Toleranz mit der Aufschrift C = 22 F gut überein.

Versuch 2:
Aufbau
Im zweiten Versuch werden mit cassy mobile der Strom und die Spannung am Ausgang des Reglers untersucht. Abb. 3 zeigt den erforderlichen Versuchsaufbau.

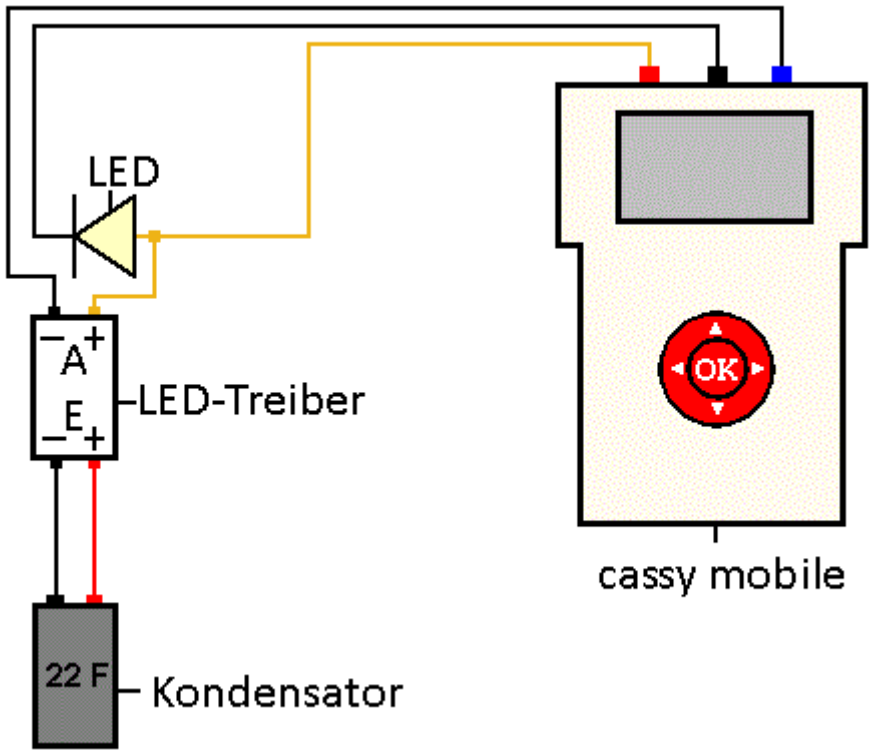


Abb. 3: Versuchsaufbau

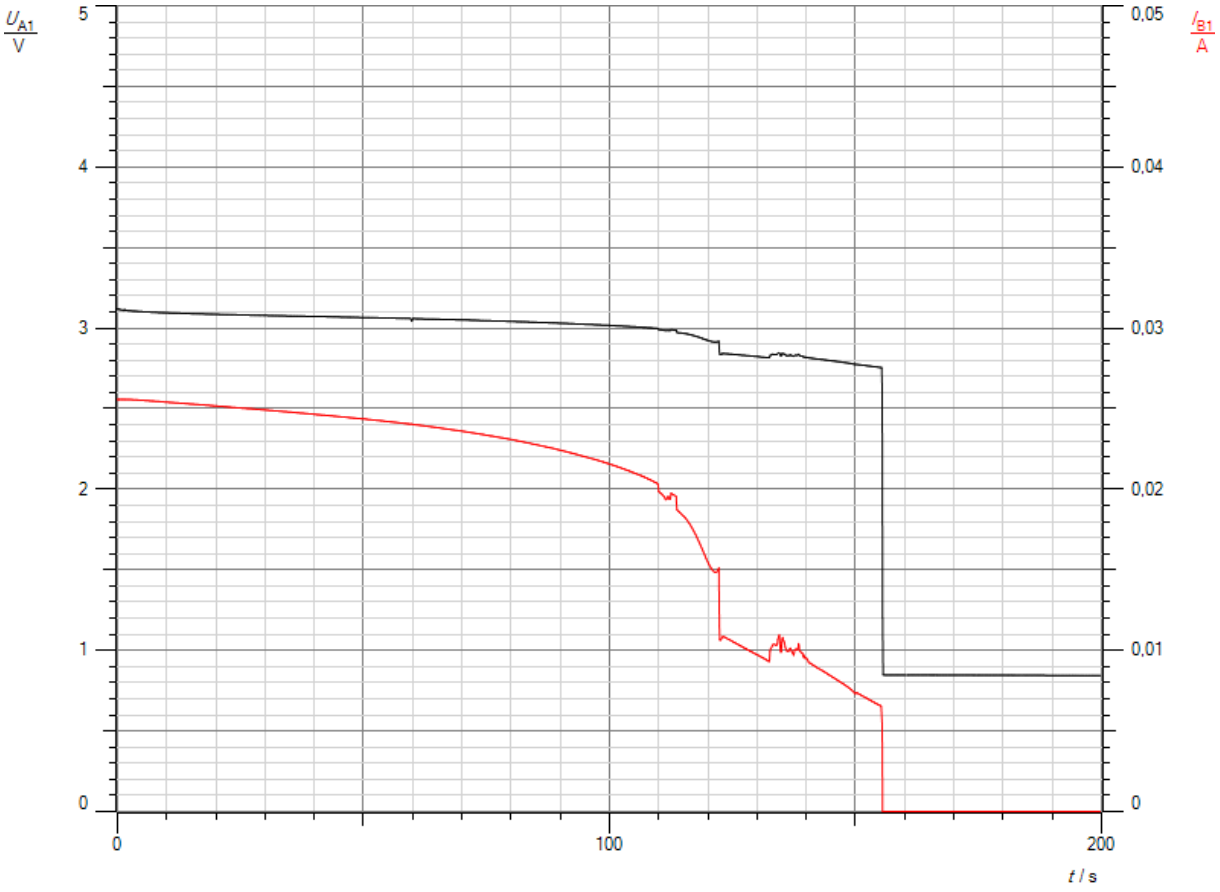
Das schwarze Kabel des Treiberausganges A- verbindet man mit der blauen Strombuchse von cassy mobile, den Minuspol der LED, die Kathode, mit der schwarzen Erdungsbuchse. Das gelbe Kabel des Treiberausganges A+ schließt man einerseits an den Pluspol der LED, die Anode, und andererseits an die rote Spannungsbuchse von cassy mobile an. An der LED ist das lange Beinchen der Pluspol, die Anode, und das kurze Beinchen der Minuspol, die Kathode.

Durchführung

Man lädt den Superkondensator an einer stabilisierten Gleichspannungsspannungsquelle auf U = 1, 5 V auf. Man trennt ihn von der Spannungsquelle und verbindet ihn mit den Eingängen E- und E+ des Schaltreglers. Das rote Kabel ist der Pluspol, das schwarze der Minuspol. Man startet cassy mobile. Man stoppt die Messung einige Sekunden, nachdem die LED erloschen ist.

Beobachtung

Man erhält z.B. folgende Messkurve:



Messkurve 1: Spannungs- und Stromverlauf am Treiberausgang

Auswertung

Obwohl die Eingangsspannung am Kondensator nur U_E = 1,5 V beträgt und während des Versuches abnimmt, wie in Versuch 1 gezeigt wurde, liegt an der LED eine nahezu konstante Spannung von etwa U_A = 3 V an. Sie sinkt im Zeitraum t = 0 – 100 s von U_1 = 3,1 V auf U_2 = 3,0 V. Der Strom fällt im gleichen Zeitraum von I_1 = 25,5 mA auf I_2 = 21,5 mA. Die LED wird in diesem Zeitraum mit fast konstanter Leistung betrieben und leuchtet etwa mit gleichbleibender Helligkeit. Danach sinkt sie rasch ab, nach etwa t = 155 s schaltet sich die

LED automatisch ab. Wertet man die U(t)-Kurve bzw. I(t)-Kurve im Zeitraum t = 0 -100 s mit cassy graphisch aus, so erhält man folgende Mittelwerte:

$$U_A = 3{,}065V$$

$$I_A = 0{,}0241A$$

$$P_A = U_A * I_A = 0{,}07375W.$$

Nach Versuch 1 beträgt die mittlere Eingangsleitung P_E im untersuchten Zeitraum

$$P_E = 0{,}1093W.$$

Damit besitzt die Schaltung einen Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{P_A}{P_E} * 100\% = 67{,}5\%.$$

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 Artikelnummmer: 167809
4) Datenblatt LD 1117, Bezugsquelle: www.conrad.de/produktinfo Artikelnummmer: 147010
5) Datenblatt LT1073, Bezugsquelle: www.conrad.de/produktinfo Artikelnummmer: 151773
6) Datenblatt RCD–24–0.35, Bezugsquelle: www.conrad.de/produktinfo Artikelnummer: 180321.
7) Datenblatt LNK 501, Bezugsquelle: www.powerint.com
8) Datenblatt MPL1, Bezugsquelle: www.conrad.de/produktinfo Artikelnummmer: 175947