

Kleine DC/DC-Konverter

Gleichspannungswandler unter der Lupe

Von Prof. Dr.-Ing. Martin Oßmann

Schaltnetzteile gehören nicht unbedingt zu den beliebtesten Schaltungen von Hobbyelektronikern. Spezialteile sind oft schwer zu beschaffen und teuer, und Fehler werden mit einem lauten und teuren Knall bestraft. Beschränkt man sich aber auf kleine Spannungen und sehr kleine Leistungen, gibt es ein paar universelle und modifizierbare Schaltungen, an denen man die wichtigsten Prinzipien veranschaulichen kann.

Die Aufgabe von DC/DC Wandlern ist, eine Gleichspannung in eine andere Gleichspannung umzusetzen. Dabei kann die neue Gleichspannung höher, niedriger, invertiert und oder isoliert von der Eingangsgleichspannung sein. Dementsprechend gibt es mehrere Converterprinzipien, von denen wir einige besprechen.

Die Grundsaltungen sind in **Bild 1** zusammengefasst dargestellt. Die Eingangsspannungen sind mit U_{in} bezeichnet, die Ausgangsspannung mit U_{out} . Allen hier gezeigten Schaltungen ist gemeinsam, dass die wesentliche Funktion von einem Schalter S, einer Diode D und einer Spule L erledigt wird. Zuerst besprechen wir die einfachste Schaltung, den so genannten Down- oder Buck-Konverter, auch als Tiefsetzsteller bekannt. Er setzt eine Eingangs- in eine niedrigere Ausgangsspannung um. Sein Arbeitsprinzip ist wie folgt umrissen: Ist der Schalter S geschlossen, liegt an der Induktivität L eine positive Spannung U_L , weil $U_{in} > U_{out}$ ist. Deswegen steigt der Spulenstrom linear an. Die Spule nimmt Energie auf. Öffnet man nun den Schalter S, fließt der Strom weiter durch die Spule in den Ausgangskondensator, aber über die Diode D. Jetzt ist die Spulenspannung U_L negativ, so dass der Spulenstrom

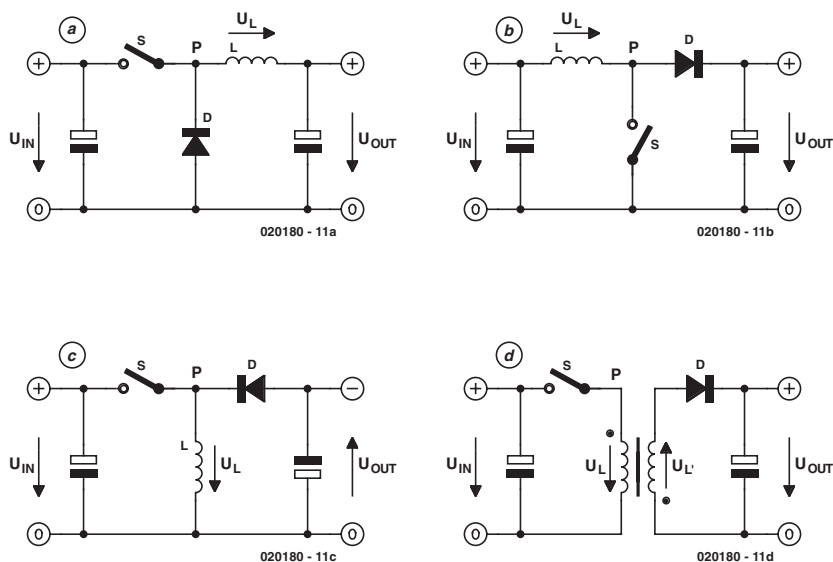


Bild 1. Einige DC/DC-Wandler: a) Buck, b) Boost, c) BuckBoost, d) Flyback

linear sinkt. Die in der Spule gespeicherte Energie wird zum Ausgang transferiert. Dann schaltet man Schalter S wieder ein, und das Spiel beginnt von vorne. Welche Spannung am Ausgang

erzeugt wird, hängt nun davon ab, wie man den Schalter ansteuert. Dabei können sich prinzipiell drei Arten des Stromverlaufes einstellen, wie sie im **Bild 2** dargestellt sind. Ist der Spulenstrom beim Einschalten

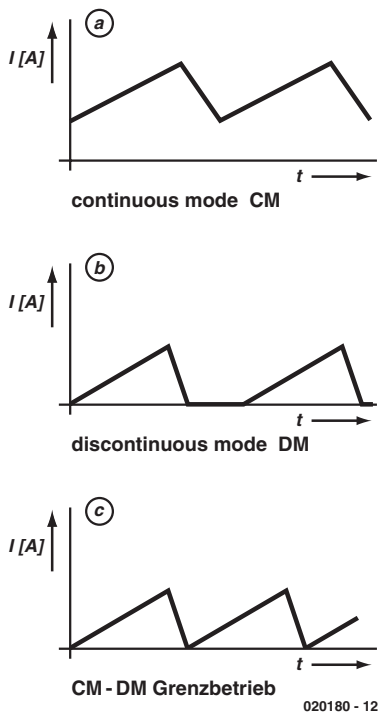


Bild 2. Prinzipielle Stromformen

des Schalters S noch nicht auf Null abgeklungen, fließt ständig ein Spulenstrom: Man spricht vom kontinuierlichen Betrieb (CM Continuous Mode). Ist der Spulenstrom wie in b) zeitweilig null, spricht man vom diskontinuierlichen oder lückenden Betrieb (DM discontinuous mode). Lässt man den Spulenstrom genau auf Null sinken und schaltet dann sofort den Schalter wieder ein, spricht man von CM/DM Grenzbetrieb.

Über die Einschaltedauer beziehungsweise das Puls/Pausenverhältnis kann man nun Ausgangsspannung und übertragene Leistung regeln. Soweit die Theorie, doch nun direkt zu einer einfachen praktischen Schaltung.

LED-Treiber

Die Schaltung [1] in **Bild 3** versorgt eine LED, ausgehend von einer Betriebsspannung von 9 V mit hohem Wirkungsgrad. Die Bauteile wurden von der Originalschaltung auf europäische Verhältnisse angepasst. Wie funktioniert sie nun im Detail?

Transistor T1 erfüllt die Funktion des Schalters S. Diode D1 und Spule L1 bilden die weiteren Komponenten

des Down-Konverters. Nach dem Einschalten sorgt R3 für einen ersten Basisstrom für T2 (da die Durchlassspannung von D2 höher als 0,7 V ist) und T2 beginnt zu leiten. Dann bekommt aber auch T1 via T2 Basisstrom, so dass er leitet. Die Spannung an Punkt P steigt und versorgt T2 nun mit viel Basisstrom. Am Punkt P liegen nun etwa 9 V, der Strom in L1 beginnt, anzusteigen. Die Stromanstiegsgeschwindigkeit wird dabei von der Induktivität und der an ihr liegenden Spannung bestimmt. Der steigende Strom führt zu einem Spannungsabfall an R1. Erreicht dieser 0,7 V (bei etwa 70 mA), beginnt auch T3 zu leiten und zapft den Basisstrom von T1 ab. Der Strom an L1 kann nicht weiter steigen, deswegen sinkt die Spannung an Punkt P. Dadurch wird T2 ausgeschaltet und letztendlich auch T1. Der Strom durch L1 fließt nun durch D1 weiter, bis er auf null gesunken ist. Dann steigt die Spannung an T2 wieder und das Spiel beginnt von Neuem. Die Transistoren sorgen durch die Verschaltung als Thyristortetrode für die positive Rückkopplung, die die Schwingung erzeugt. T3 führt zum Abschalten von T1 beim eingestellten Stromwert. Der Konverter arbeitet an der CM/DM Grenze. Ein Foto eines Testaufbaus ist in **Bild 4** zu sehen.

Modifikationen

Will man aus dieser Schaltung anstatt einer LED eine andere Schaltung mit Energie versorgen, schwingt die Schaltung bei vielen Lasten nicht an, weil die Belastung das anfängliche Einschalten von T2 über R3 verhindert. Abhilfe schafft ein Kondensator (0,1 μF) zwischen Punkt P und der Basis von T2. Weiter ist zur Glättung der Spannung ein Elko (10 μF) am Ausgang anzuschließen. Der Konverter arbeitet ungeregelt und stellt eher eine Strom- als eine Spannungsquelle dar. Für manche einfache Anwendung kann so etwas aber schon ausreichend sein.

5 V auf 12 V Aufwärtswandler

Kann man mit dem gleichen Konzept auch einen Aufwärtswandler realisieren? Zuerst zur grundlegenden

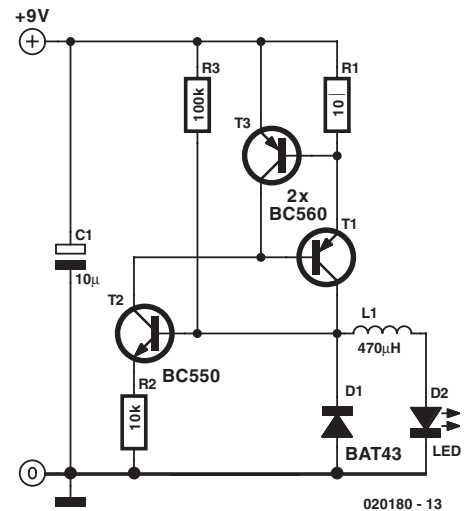


Bild 3. Down-Konverter zum LED-Betrieb

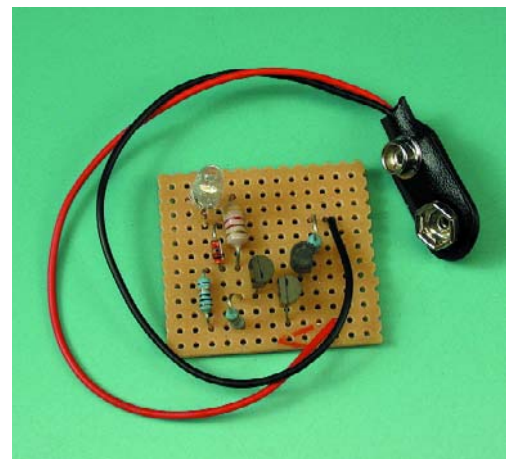


Bild 4. Testaufbau des LED-Konverters

Funktion des Aufwärts-Konverters (Boost-Konverter, Hochsetzsteller) nach Bild 1b. Ist Schalter S geschlossen, ist die Spulenspannung U_L gleich der Eingangsspannung und der Spulenstrom steigt linear an. Öffnet man nun Schalter S, so sorgt die Spule dafür, dass der Strom weiterfließt, und zwar unabhängig davon, wie hoch die Ausgangsspannung ist. Der Strom fließt dann durch Diode D. Im stationären Fall ist die Ausgangsspannung höher als die Eingangsspannung und die Spulenspannung U_L negativ, was wiederum zu linearem Sinken des Spulenstroms führt. In dieser Phase wird wieder die Energie aus der Spule in den Ausgang transportiert. Dann schaltet man S wieder ein und das Spiel wiederholt sich.

Um nun aus Schaltung Bild 3 einen Aufwärtswandler zu machen stellen wir erstmal alle Transistoren auf den Kopf, um den Schalter S "nach unten" zu bringen, wie das Prin-

zipschaltbild nach Bild 1 verlangt. Auch die Position von Diode D1 und Spule L1 vertauschen wir. Die Rückkopplung von T1 nach T2 wird modifiziert und siehe da, die in **Bild 5** dargestellte Schaltung funktioniert.

Mit der Zenerdiode D2 können wir sogar eine Regelung der Ausgangsspannung auf 12 V realisieren. Wird die Ausgangsspannung zu hoch, verschiebt sich der Arbeitspunkt von T2, so dass T1 kürzer oder zeitweise gar nicht eingeschaltet wird. Bei einem Ausgangsstrom von 20 mA stellt sich eine Ausgangsspannung von 12,6 V ein. Bei 5 V Eingangsspannung liegt der Eingangsstrom dann bei 64 mA. Der Wirkungsgrad beträgt damit 77 %, gar nicht schlecht für so eine simple Schaltung. In Bild 6 ist der Probeaufbau zu sehen.

Geregelter Down-Konverter

Geht es nicht noch einfacher, reichen viel-

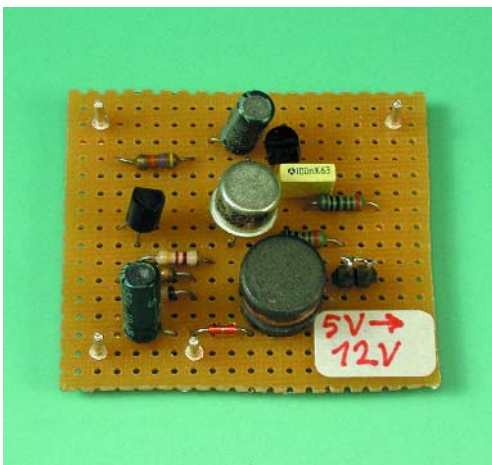


Bild 6. Aufbau des Konverters nach Bild 5

leicht sogar zwei Transistoren? Es geht tatsächlich. **Bild 7** zeigt einen geregelten Down-Konverter von 20 V auf 12 V. Er wurde in der Literatur [2,3] beschrieben, lediglich die Bauteile sind an europäische Verhältnisse angepasst.

Die zentralen Bauteile des Down-Konverters sind Transistor T1, Diode D1 und Spule L1. Erkennbar ist wieder die rückgekoppelte pnp/npn Transistor-Kombination. In diesem Konverter wird der Transistor T1 nicht durch das Erreichen des maximalen Spulenstroms ausgeschaltet, sondern gesteuert von der RC-Kombination C2/R4. Gleichzeitig sorgt die Zenerdiode D2 mit dem Emitteranschluss von T2 am Ausgang für die Spannungsregelung. Der Wirkungsgrad dieses Konverters wird mit bis zu 90 % angegeben.

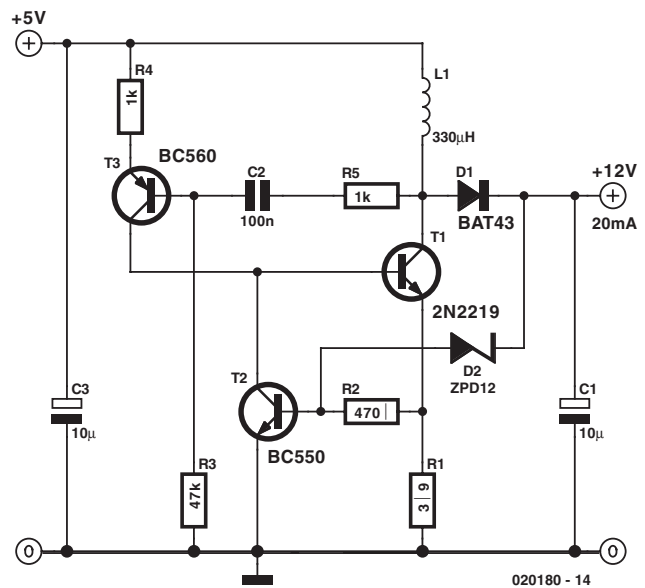


Bild 5. Geregelter 5-nach-12V-Konverter

1,2 V auf 5 V Aufwärtswandler

Auch dieser Down-Konverter lässt sich in einen Up-Konverter verwandeln. Das Ergebnis ist in **Bild 8** zu sehen. Gegenüber der Schaltung aus Bild 5 hat diese den Vorteil, dass Sie schon mit 1,2 V Betriebsspannung einwandfrei arbeitet. Die Funktion des Down-Konverters übernehmen wieder Transistor T1 mit Spule L1 und Diode D1. Die Regelung wird wieder über die Zenerdiode D4 gesteuert, die allerdings diesmal an der Basis von T2 eingreift.

In dieser Schaltung wird aus einer NiCd-Zelle (1,2 V) die Betriebsspannung für ein 5-V-System erzeugt. Die Schaltung kann maximal 10 mA bei 5 V liefern, was heute ausreicht, um Low-power-Mikrocomputer zu betreiben. Manchmal benötigt man dann zusätzlich noch ein wenig Strom aus einer negativen Versorgungsspannung, beispielsweise für einen Operationsverstärker oder als LCD-Bias. Diese Funktionalität wurde der Schaltung hinzugefügt. Kondensator C4 mit Dioden D2 und D3 bilden einen einfachen Ladungspumpenkonverter. Dieser erzeugt ungere-

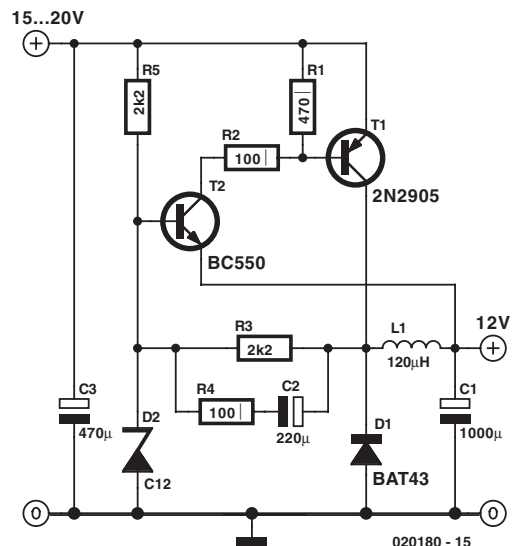


Bild 7. Geregelter Down-Konverter mit zwei Transistoren

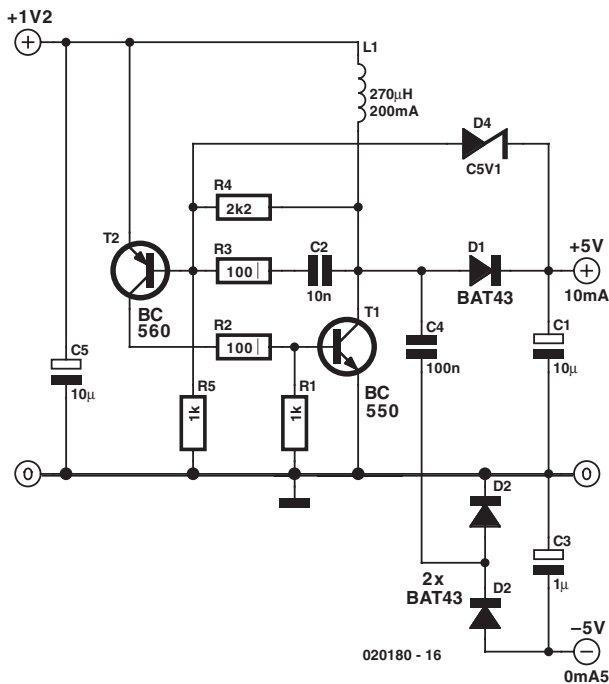


Bild 8. Boost-Konverter von 1,2 V auf 5 V

gelte -5 V bei maximal 0,5 mA. Der Wirkungsgrad dieser Schaltung liegt bei ungefähr 60 %. Das ist sicher nicht berauschend, aber bei einer niedrigen Betriebsspannung fällt jeder Spannungsabfall ins Gewicht. Fällt an der Kollektor-Emitter-Strecke

des Schalttransistors im leitenden Zustand 0,2 V ab, sind bereits 20 Prozent der Energie verloren. Die Transistoren müssen kräftig durchgesteuert werden, was einen hohen Basisstrom bedingt. Dies reduziert aber wiederum den Wirkungsgrad.

5 V auf ±12 V und mehr

Als Schaltnetzteilvariante fehlt nur noch der Invers-Wandler, der aus einer positiven Spannung eine negative macht. Das Grundprinzip ist in Bild 1 c dargestellt. Ist der Schalter S geschlossen, steigt der Strom in der Induktivität wieder linear an. Wird der Schalter nun geöffnet, so fließt der Strom durch die Spule weiter, und zwar natürlich wieder durch die Diode D. Dadurch entsteht eine negative Ausgangsspannung. Bei diesem Konverter gibt es übrigens einen kleinen Unterschied zu den vorhergehenden: Beim Invers-Wandler findet zu keiner Zeit ein direkter Energietransfer vom Eingang zum Ausgang statt. Statt dessen wird die gesamte Energie immer erst in der Induktivität gespeichert. Im Gegensatz dazu wird beim Buck- und beim Boost-Konverter in bestimmten Phasen Energie direkt vom Eingang zum Ausgang transportiert. Der Wert der Ausgangsspannung kann beim

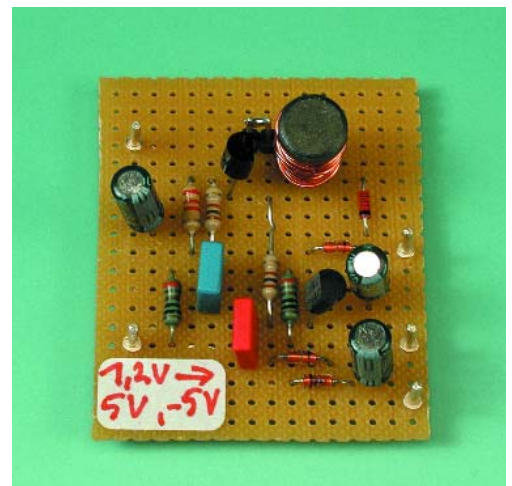


Bild 9. Aufbau des Konverters aus Bild 8

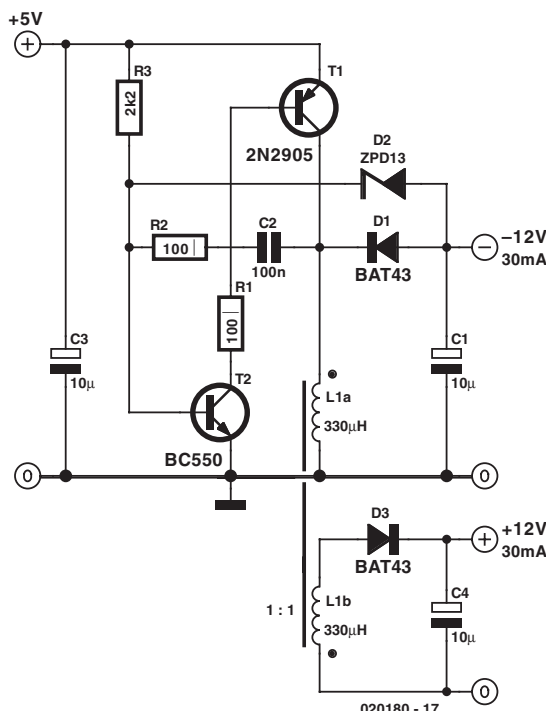


Bild 10. Invers/Flyback-Wandler in Einem

Invers-Wandler, je nach Betriebsart, größer oder kleiner als der Wert der Eingangsspannung sein. Deshalb bezeichnet man diesen Konvertertyp auch als Up-Down- oder Buck-Boost Konverter wird. Der Versuchsaufbau in **Bild 10** ist in der Lage, aus einer Eingangsspannung von 5 V eine Spannung von -12 Volt zu erzeugen. Die Grundschaltung ist wieder die gleiche wie in Bild 3 und Bild 7.

Isolierende Wandler

Als letztes bleibt nun noch zu erklären, wie man eine isolierte Spannung erzeugen kann. Das Grundprinzip ist in Bild 1d dargestellt. Statt einer einfachen Spule kommt aber eine Induktivität mit zwei Wicklungen zum Einsatz. Leitet Schalter S, steigt der Spulenstrom

in der ersten (Primär-) Wicklung linear an, wie beim Inverswandler auch. Es wird Energie in der Induktivität gespeichert. Nun wird der Schalter S geöffnet, so dass in der Primärwicklung kein weiterer Strom fließen kann, sondern nur in der Sekundärwicklung durch die Diode D. Die Energie fließt aus der Induktivität heraus in den Ausgang. Diesen Konverter nennt man auch Flyback- oder Sperrwandler, weil die Energie dann zum Ausgang fließt, wenn der Transistor sperrt. Die gesamte Energie muss, bevor Sie den Ausgang erreicht, wie beim Invers-Wandler erst in der Induktivität gespeichert werden. Anstatt von einem Transformator spricht man deshalb hier oft von einer Induktivität mit zwei Wicklungen.

Da der Flyback- dem Inverswandler so ähnlich sieht, ist kein neues Schaltbild erforderlich. Wir bringen einfach eine zweite Wicklung auf die Spule des Inverswandlers (Wicklungssinn beachten) und erhalten einen zusätzlichen galvanisch getrennten Ausgang. Das Windungszahlen-Verhältnis ist 1:1, daher sind die beiden Ausgangsspannungen gleich. Durch ein anderes Übersetzungsverhältnis kann man mit einem Flyback-Wandler auch wesentlich höhere oder niedrigere Ausgangsspannungen erreichen, ohne ein allzu extremes Tastverhältnis einsetzen zu müssen. Im Fall von Bild 10 ist übrigens nur der Ausgang des Invers-Wandlers geregelt, der zweite (Flyback-) dagegen nicht. Der Wirkungsgrad dieser Schaltung liegt auch bei etwa 60 % und mit ihr kann man bequem eine positive und negative Versorgungsspannung für Opamps aus einer 5-V-Spannung erzeugen.

Spulen

Das einzige Spezialbauteil in unseren Schaltungen sind die Induktivitäten. Zu diesen einige Bemerkungen. Im Fachhandel gibt es kleine Festinduktivitäten, die aber aufgrund ihres hohen Gleichstromwiderstandes für unsere Anwendungen nicht geeignet sind. Größere Bauformen mit entsprechender Strombelastbarkeit kann man allerdings verwenden. Als besonders einfach anzuwenden stellten sich so genannte Trommel-Kerne heraus, wie sie in **Bild 11** dargestellt sind (Durchmesser und Höhe etwa 10 mm). Diese finden sich manchmal in alten PC-Netzteilen und können umgewickelt werden. In unseren Mustern fand dafür Draht mit 0,2...0,3 mm Durchmesser Verwendung. Der große "Luftspalt" sorgt dabei dafür, dass das Kernmaterial nicht in Sättigung gerät. Beim Wickeln der Doppel-Induktivität für Flyback-Wandler ist auf sehr gute Kopplung zwischen den



Bild 11. Trommelkerne für Spulen

Wicklungen zu achten. In der Spule für den Wandler aus Bild 10 wurde dies erreicht, indem beide Wicklungen bifilar (quasi mit einem Doppeldraht) gewickelt wurden.

Ausblick

Wie wir gesehen haben, kann man auf einfache Weise verschiedenste Schaltnetzteile bauen. Derartige Bil-

lig-Wandler finden übrigens häufig Anwendung in „preiswerten“ Elektronikprodukten und stellen den Schrecken aller Service-Techniker dar, denn wenn irgendwas nicht klappt, geht auch gar nichts mehr. Das ist halt der Nachteil dieser so genannten selbstschwingenden Wandler.

(020180)jrg

Weiterbildung

Vielleicht hat dieser Artikel ja auch bei Ihnen den Appetit auf effiziente Schaltnetzteile angeregt. Schauen Sie mal auf die Web-Sites und Firmenschriften der Halbleiterhersteller:

Motorola bzw. ON-Semiconductor	http://www.onsemi.com
Texas Instruments / Unitrode	http://www.ti.com
Linear Technology	http://www.linear-tech.com
Maxim	http://www.maxim-ic.com
Infineon	http://www.infineon.com
STMicroelectronics	http://www.st.com
International Rectifier	http://www.irf.com

Literatur

- [1] J.S. Rohrer, LED Switching driver Cuts Current Draw to 3 mA, Electronic Design, August 7.th, 2000, Page 130
- [2] Eugene E. Mayle, Low-Cost Step-Down Regulator, Electronic Design, February 6.th 1995, page 118
- [3] Professionelle Schaltungstechnik, Band 9, Seite 583, Franzis Verlag