

## Ergänzung zum Beitrag in FA 10/14, S. 1072 ff. „Gleichspannungswandler mit hohem Wirkungsgrad“

In der Tabelle 1 sind für einige relevante Bauelemente die Bestellnummern bei verschiedenen Lieferanten aufgeführt. Der Ferritkern B65813-J630, der für L1 in Bild 2 des Beitrags Verwendung fand, hat laut Hersteller einen  $A_L$ -Wert von 630 nH/Wdg<sup>2</sup>. Bei 36 Wdg ist also rechnerisch eine Induktivität  $L$  von

$$L = 630 \frac{\text{nH}}{\text{Wdg}^2} \cdot (36 \text{ Wdg})^2 = 816 \mu\text{H} \quad (1)$$

zu erwarten. Eine Nachmessung (Betrieb als Parallelschwingkreis mit Kondensatoren 1 nF, 10 nF und 100 nF, Anwendung der Thomsonschen Schwingungsgleichung) bestätigt mit Werten zwischen 820  $\mu\text{H}$  und 840  $\mu\text{H}$  die Rechnung.

Bei einem Spulenstrom von beispielsweise 2 A, multipliziert mit 36 Wdg, ist die magnetische Spannung

$$U_m = 2 \text{ A} \cdot 36 = 72 \text{ A}.$$

Der Kern hat laut Epcos-Datenblatt eine Magnetkreislänge von  $l_E = 44 \text{ mm}$ . Die magnetische Feldstärke wird mit

$$H = \frac{U_m}{l}$$

somit

$$H = \frac{72 \text{ A}}{44 \text{ mm}} = 1636 \text{ A/m}.$$

Bedingt durch den Luftspalt von 0,13 mm, gibt der Hersteller eine effektive Permea-

**Tabelle 1: Bezugsquellen ausgewählter Bauteile**

Bauteil	Distrelec	Bürklin	RS Components	Farnell	Digikey
TC4421CPA	-	47 S 9908	207-0146	119-6786	TC4421CPA-ND
TC4422CPA	-	-	207-0168	119-6785	TC4422CPA-ND
Kernsatz B65813-J630 (Luftspalt 0,13 mm)	332130	83 D 112	-	-	495-5277-ND
Spulenkörper für Kern B65813-J630	330786	83 D 148	-	-	495-5288-ND
Klammer für Kern B65813-J630	330794	83 D 178	647-9266	-	495-5285-ND
Kernsatz B65646-250-A27 (Luftspalt 2 mm)	332146	83 D 352	212-5016	-	495-5141-ND
Spulenkörper für Kern B65646-250-A27	331140	83 D 356	212-5038	-	495-5145-ND
Halterung für Kern B65646-250-A27	331150	83 D 358	647-9070	-	495-5144-ND

Distrelec: [www.distrelec.de](http://www.distrelec.de); Bürklin: [www.buerklin.de](http://www.buerklin.de); RS Components: [www.rsonline.de](http://www.rsonline.de); Farnell: [www.farnell.de](http://www.farnell.de); Digikey: [www.digikey.com](http://www.digikey.com)

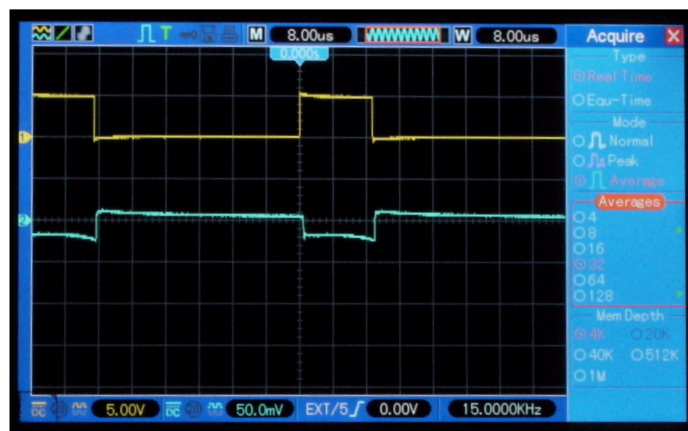
mT bei 25 °C angegeben. Ein Strom von 2 A ist mit dieser Spule also noch zulässig. Bei einem Abwärtsspannungswandler ist der Strom in der Speicherdrossel jedoch nicht konstant, sondern sägezahnförmig. Allgemein gilt:

$$U_L = L \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (3)$$

Wenn der „obere MOSFET“ (T3 in Bild 2 des Beitrags) durchgesteuert ist, dann liegt über L1 die Differenz aus Eingangs- und Ausgangsspannung. Ist T4 durchgesteuert, dann ist  $U_L = -U_A$ . Bei einem Tastverhältnis von 0,5 und  $U_B = 24 \text{ V}$  wird  $U_A = 12 \text{ V}$ . Mit 15 kHz Arbeitsfrequenz ist  $\Delta t = 33 \mu\text{s}$ , sodass sich  $\Delta i = 0,5 \text{ A}$  ergibt. Das ist schon

Ansteuersignal an der Basis von T1. Einige Millimeter über dem Ferritkern lag eine Luftspule mit 7 Wdg und 3 cm Durchmesser. Die in ihr induzierte Spannung ist blau dargestellt.

Die Ausgangsspannung war durch das Tastverhältnis von 0,26 auf 6,5 V eingestellt. Zunächst wurde der Ausgang mit 4,6  $\Omega$  belastet. Der resultierende Laststrom von 1,4 A lässt L1 noch nicht in die Sättigung gehen, wie in Bild 1 erkennbar ist. Das Streufeld des Kerns ist gering. Mit 3,3  $\Omega$  Last wächst der Ausgangsstrom auf knapp 2 A. Bild 2 zeigt, dass zu Beginn der Leitphase von T3 (Ansteuersignal auf +5 V) das Streufeld zunächst gering bleibt, um dann exponentiell anzusteigen. Die durch den Zuwachs  $\Delta i$  bedingte Erhöhung des Spulenstroms von knapp unter der Sättigungsgrenze bis darüber hinaus führt da-



bilität von  $\mu_{\text{rel}} = 226$  an. Die Magnetflusssichte beträgt

$$B = \mu_0 \cdot \mu_{\text{rel}} \cdot H = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am} \cdot 226 \cdot 1636 \text{ A/m} = 0,466 \text{ Vs/m}^2 = 466 \text{ mT}.$$

Für das hier eingesetzte Ferritmaterial wird eine Sättigungsflußdichte von 490

**Bild 1:**  
Streufeld bei 1,4 A  
Ausgangsstrom



**Bild 2:**  
Streufeld bei 2 A  
Ausgangsstrom

nicht mehr vernachlässigbar gegenüber den veranschlagten 2 A.

Die Auswirkung der Kernsättigung ist deutlich anhand der Bilder 1 und 2 erkennbar. Gelb entspricht jeweils dem 5-V-

zu, dass der Ferritkern den magnetischen Fluß nicht mehr vollständig bündelt, sondern teilweise in den Raum austreten lässt. Die Induktivität von L1 sinkt ab, und die EMV-Störungen wachsen an.

Diese Streuverluste haben auf den Wirkungsgrad der Baugruppe aber keine gravierenden Auswirkungen, wie Bild 10 des Beitrags zeigt. Selbst bei 5 A Laststrom ist die Effizienzverringern noch weitgehend durch die Spannungsabfälle an T3, T4 und L1 aufgrund Ohmscher Widerstände erklärbar.

Um die Sättigungsgrenze zu erhöhen, kann man die Windungszahl um einen Faktor  $k$  verringern. Damit verringern sich auch magnetische Spannung und Flussdichte  $k$ -fach, und man darf den Strom  $k$ -fach erhöhen. Die Induktivität sinkt gemäß Gleichung 1 jedoch um den Faktor  $k^2$  ab,

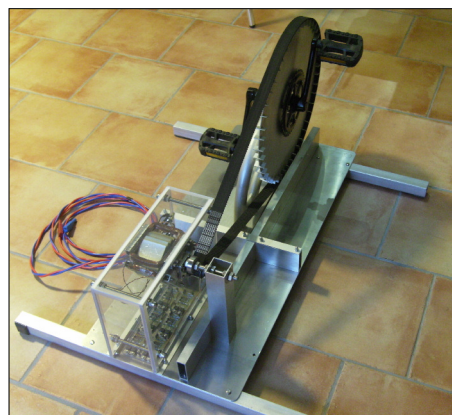
rem Luftspalt. Diese Version hätte hier  $A_L = 250 \text{ nH/Wdg}^2$  und  $\mu_{\text{rel}} = 90$ .

Generell sind Speicherdrosseln mit Luftspalt vorteilhaft, weil der überwiegende Anteil der magnetischen Spannung gar nicht über dem Ferritkern selbst, sondern über der Luftstrecke abfällt. Die magnetische Energie wird also hauptsächlich in den wenigen Kubikmillimetern Luft gespeichert. Das Ferritmaterial hat „nur“ die Aufgabe, den Fluss zu bündeln. Dementsprechend gering sind die Hystereseverluste, denn Luft hat keine solchen.

Die Bilder 3 und 5 geben die Regelgeschwindigkeit des kompletten Abwärts-



was die Welligkeit des Spulenstroms erhöht (Gleichung 3) und zum Ausgleich eine Steigerung der Schaltfrequenz nahelegt. Letzteres ließe jedoch die Umladeverluste der MOSFET-Gates steigen. Möglich wäre hier der Einsatz eines Ferritkerns gleicher Größe, aber mit breitere-



**Bild 4: Pedalbetriebener Stromgenerator**

**Bild 5:  
Reaktion auf  
Lastsprünge**  
Fotos: Franke

wandlers nach Bild 1 und 2 des Beitrags wieder, also inklusive der Ansteuerschaltung. Für Bild 3 wurde die analoge Steuerungsspannung  $U_{\text{Soll}}$  periodisch zwischen 2 V und 4 V umgeschaltet (gelb). Die Ausgangsspannung (blau), belastet mit  $4,4 \Omega$ , folgt dieser Vorgabe exakt, aber mit etwa 16 ms Einstellzeit. In Bild 5 zeigt die blaue Spur die Ausgangsspannung, die auf konstant 5 V eingestellt war. Über einen MOSFET, dessen Ansteuersignal gelb dargestellt ist, wurde die  $4,4\text{-}\Omega$ -Last am Ausgang periodisch zu- und abgeschaltet. Das transiente Unter- und Überschwingen ist auch hier nach circa 16 ms abgeklungen.

In Bild 6 ist das fertiggestellte zweite Gerät zu sehen, das neben dem elektronischen Getriebe (Bild 11 und 13 des Beitrags) noch Anzeigeinstrumente für Gene-



**Bild 6: Fertiges elektronisches Getriebe**

ratorsspannung, Ausgangsstrom und Akkuspannung enthält. Den pedalbetriebenen Generator schließlich zeigt Bild 5.

Denkbar wäre, dass mehrere Benutzer pedalbetriebener Stromgeneratoren sich über

**Bild 3:  
Reaktion auf  
Sollwertsprünge**



das Internet verbinden und ein virtuelles Radrennen veranstalten. Neben der Erzeugung von Strom zum Laden des eigenen Akkumulators – oder, wenn nicht vorhanden, zum Erhitzen des Kaffeeewassers o. Ä. – wird der Messwert für die Nettoleistung hochgeladen und mit den aktuellen Werten der Mitstreiter verglichen. (Ein echter Sportsmann wird hier selbstverständlich nicht schummeln.) Ein entsprechendes Programm erzeugt für alle eine realistisch wirkende Landschaft, in der sie sich bewegen. Der Erfolg jedes Fahrers hängt neben der eigenen Fitness auch von der Qualität und ergonomischen Gestaltung des Generators sowie dem Wirkungsgrad der Elektronik ab. Es ist also gleichzeitig ein Konstrukteurswettbewerb.

[emmmf@gmx.de](mailto:emmmf@gmx.de)