

Ergänzung zum Beitrag in FA 3/25, S. 200 f. „Ladungspumpe für eine verlustarme Spannungsversorgung“

■ Messergebnisse am Muster

Bild A1 zeigt die graphische Darstellung der Messwerte aus der Excel-Datei des lastabhängigen Wirkungsgrads (linke Y-Achse, blaue Kurven) und die lastabhängige Relation von Ausgangs- zu Eingangsstrom (rechte Y-Achse, violette Kurven). Der Abfall, insbesondere des Wirkungsgrads bei größeren Strömen, wird von den Serienwiderständen der eingeschalteten MOSFETs in IC2 verursacht. Bei geringer Last, wenn dieser Effekt vernachlässigbar ist, arbeiten IC2, C3 und C4 fast ideal: Wirkungsgrad nahe 100 %. Dann ist die Eingangsstromaufnahme gleich dem halben Laststrom. Dass die Kurven links trotzdem abfallen, liegt an der bilanziellen Auswirkung des Ruhestromes des Generators mit IC1, R1, C1. Diese Eigenstromaufnahme, am Muster zu $33 \mu\text{A}$ bei 12 V Eingangsspannung gemessen, ist für die meisten in Betracht kommenden Anwendungen genügend klein. Mehrere zuvor getestete andere Oszillatorschaltungen genehmigten sich beim Betrieb aus 12 V deutlich mehr Strom.

Für Bild A2 diene das zwischen +3 V und +12 V variierende Dreieckssignal eines Funktionsgenerators (auf Kanal 2,

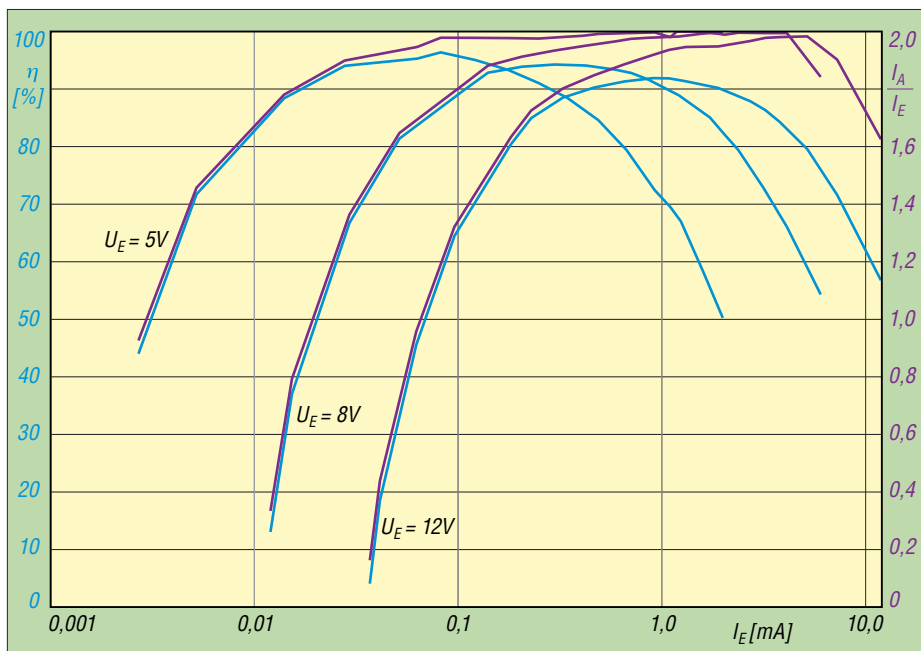


Bild A1: Lastkennlinien des Spannungshalbierers

blau) als Eingangsspannung. Am Ausgang waren ein 10-k Ω -Widerstand und der Oszilloskopkanal 3 (rot, mit 1 V/Div.) angeschlossen. Die recht gute Deckungsgleichheit beider Verläufe zeigt anschaulich die stattfindende Span-

nungshalbierung, die jedoch bei den kleinsten Leistungen mit etwas Trägheit behaftet ist.

In Bild A3 werden dem Eingang konstante +12 V von einem Netzteil zugeführt (wieder Kanal 2, blau). Der Ausgang ist jetzt mit 1 k Ω belastet und bricht vom Sollwert +6 V auf etwa +5,4 V ein. Dieselbe Ausgangsspannung geht auch auf Kanal 4 (Wechselspannungskopplung, 10 mV/Div.) und zeigt hier eine Welligkeit von $U_{SS} = 16 \text{ mV}$. Wie im Beitrag erläutert, ist diese Amplitude ungefähr proportional zum Laststrom und reziprok zum Quadrat der Umschaltfrequenz und kann zudem durch Vergrößern von C3, C4 gesenkt werden.

Das FFT-Spektrum dieser *Ripple*-Spannung ist in Bild A4 dargestellt. Die Amplitude der Frequenzlinien fällt recht schnell ab, sodass die Welligkeit kaum Probleme bei der Stromversorgung von HF-Empfängern verursachen dürfte. Hier wird der Vorteil der sehr geringen Umschaltfrequenz deutlich. Ein kleiner Makel ist das fast konstant bleibende Amplitudenspektrum oberhalb etwa 7 kHz. Ursache hierfür sind die in Bild A3 sichtbaren spitzen Verläufe an den Fußpunkten der *Ripple*-Spannung, die einem Frequenzkamm („Lattenzaun“) im Spektrum entsprechen.

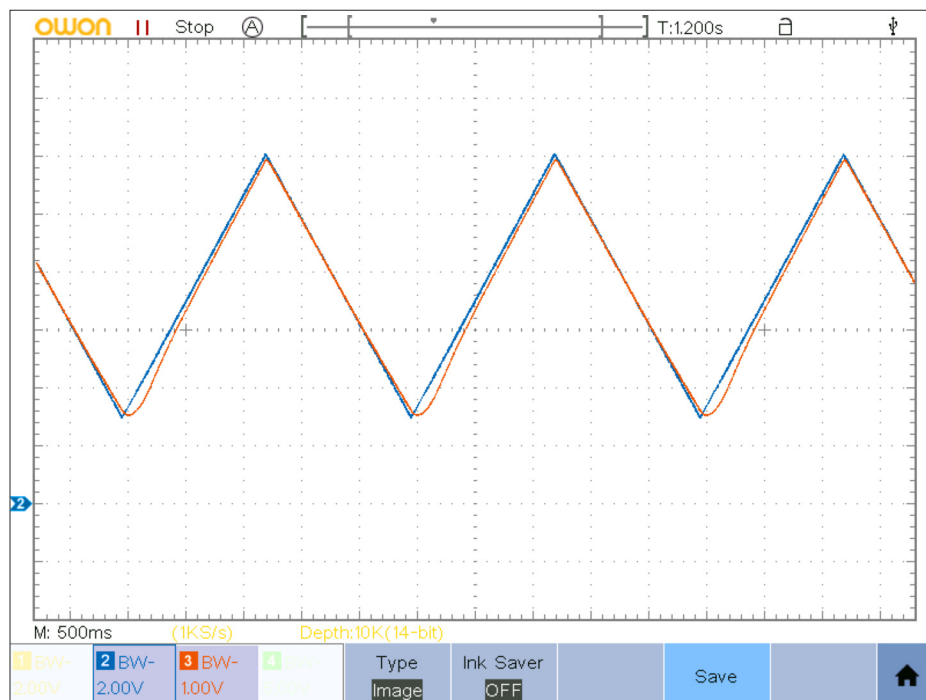


Bild A2: Proportionalität zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung für $U_E = +3 \text{ V}$ bis +12 V

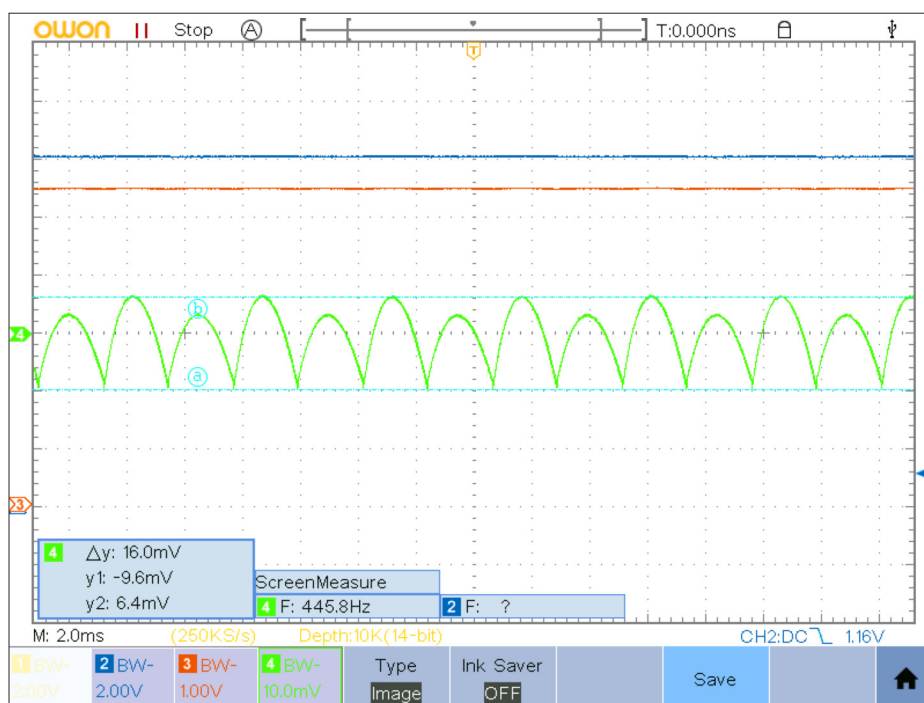


Bild A3: Ausgangswelligkeit bei $U_E = +12\text{ V}$ und $1\text{ k}\Omega$ Ausgangslast; die eingelöteten Kondensatoren C3 und C4 haben jeweils $100\text{ }\mu\text{F}$.

Abhilfe kann leicht durch Verrundung dieser Spitzen geschaffen werden, indem zwischen Modulausgang und Last ein zusätzliches RC- oder LC-Siebglied eingefügt wird.

Wirkungsgrad bei der Kondensatoraufladung

Die Energie eines geladenen Kondensators beträgt $E = C/2 \cdot U^2$, die Ladung ist:

$$Q = C \cdot U$$

Es besteht eine gewisse Verwandtschaft zu kinetischer Energie und Impuls eines bewegten Objekts, beispielsweise einer Kugel im Newton-Pendel. Wird nun ein entladener Kondensator C über einen Reihenwiderstand R an eine Eingangsspannung U_E angeschlossen, dann lädt er sich gemäß $U_C(t) = U_E \cdot (1 - e^{-t/RC})$ mit asymptotisch abnehmender Geschwindigkeit auf U_E auf. Zerlegt man diesen Vorgang gedanklich in sehr kleine Zeit-

abschnitte, so lässt sich zu jedem Zeitpunkt ein differentieller Ladewirkungsgrad (Zunahme der Kondensatorenergie gegenüber der von der Quelle U_E aufgewandten Energie) angeben:

$$\eta_{\text{diff}} = d(E_C) / U_E \cdot I_E(t) \cdot dt$$

$$\text{mit } d(E_C) = C/2 \cdot (U_{C(t+dt)}^2 - U_{C(t)}^2)$$

Nachrechnen ergibt, dass dieser differentielle Wirkungsgrad anfangs praktisch Null ist, bei halber Kondensatorspannung 50 % erreicht und bei U_C nahe U_E gegen 100 % strebt. Für den Gesamtvorgang folgt daraus:

$$\eta_{\text{ges}} = (1 + U_{C \text{ Anfang}} / U_{C \text{ Ende}}) / 2$$

Mit einem anfangs leeren Kondensator wird der Wirkungsgrad für Vollladung somit 50 %. Das gilt auch beim Verbinden eines leeren Kondensators C1 mit einem gleich großen aufgeladenen Exemplar C2: Die Ladung verteilt sich hälftig und verlustfrei auf beide Kondensatoren, aber 50 % der Anfangsenergie von C2 werden im Widerstand R der Verbindung in Wärme umgesetzt, unabhängig von dessen Wert.

Für die im Beitrag beschriebene Schaltung sowie ganz allgemein für Ladungspumpenkonverter bedeutet dies, dass sich die Spannung der beteiligten Kondensatoren während jedes Umladevorganges nur möglichst wenig ändern sollte. Dann ist ein Wirkungsgrad bei der Spannungswandlung von theoretisch 100 % erzielbar. Ganz nebenbei geht die verbleibende Welligkeit der Ausgangsspannung und des Eingangsstromes gegen Null. Beides lässt sich durch hohe Umschaltfrequenz oder große Kapazitätswerte erreichen. Im aufgebauten Muster wurde Letzteres realisiert, um die Frequenz niedrig halten zu können.

emmmf@posteo.de

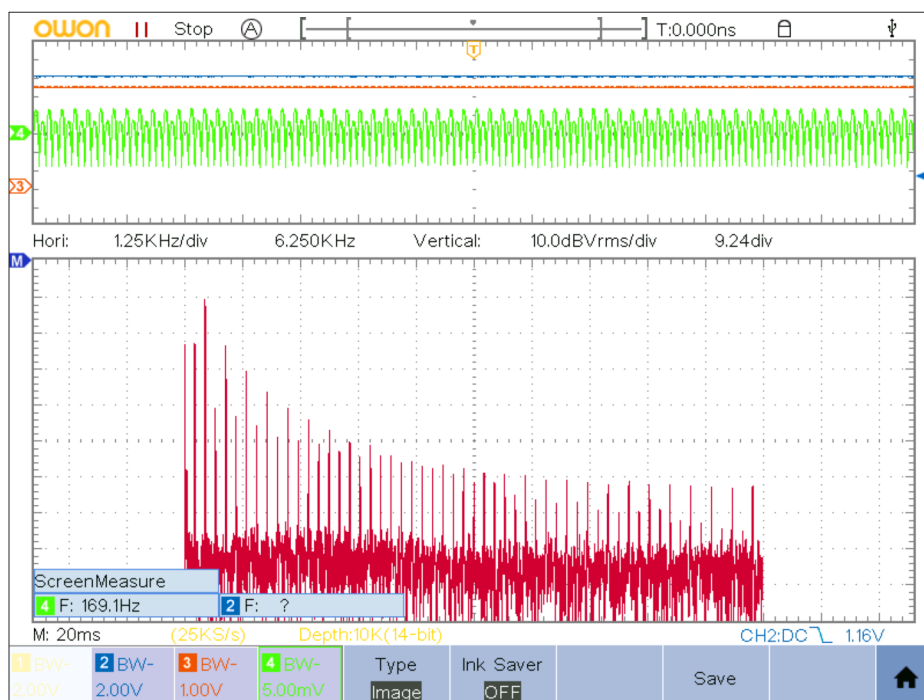


Bild A4: Das Spektrum der Ausgangswelligkeit zeigt Oberwellen, die schon bei 7 kHz um 50 dB abgefallen sind.