

Wie ein smarter Ingenieur sehr einfach Stromversorgungen entwickeln kann

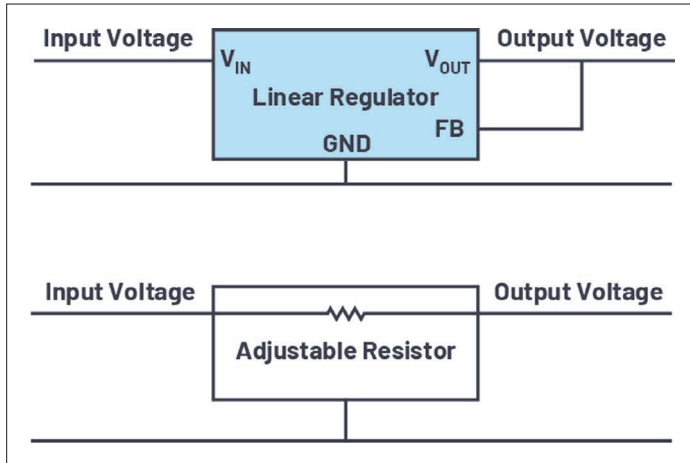


Bild 1: Ein Linearregler setzt eine Spannung auf eine andere um

Dieser Artikel gibt einen Überblick über die diversen Möglichkeiten Stromversorgungen zu entwickeln. Er erläutert die Grundlagen und beschreibt die üblicherweise verwendeten isolierten und nicht isolierten Stromversorgungstopologien mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen. Hierbei werden auch elektromagnetische Interferenzen (EMI) und Filter betrachtet. Dieses Tutorial zielt darauf ab, ein besseres Verständnis und eine neue Beurteilung der Kunst der Stromversorgungsentwicklung zu gewinnen.

Die meisten Elektroniksysteme benötigen eine Wandlung der Spannung der Stromversorgung auf die Spannung der Schaltung, die versorgt werden soll. Wenn Batterien Ladung verlieren, fällt ihre Spannung ab. Eine DC/DC-Wandlung kann sicherstellen, dass deutlich mehr der in der Batterie gespeicherten Energie dazu genutzt wird, eine Schaltung zu versorgen. Auch aus einem 220-V-Stromnetz kann man



Autor:
Frederik Dostal,
Field Applications Engineer
Analog Devices Inc.
www.analog.com

keine Halbleiter, wie z. B. Mikrocontroller direkt versorgen. Weil die Spannungswandler, auch als Stromversorgungen bezeichnet, in nahezu jedem elektronischen System eingesetzt sind, wurden sie mit den Jahren für unterschiedliche Aufgaben optimiert. Allerdings sind die üblichen Optimierungsziele nach wie vor gleichgeblieben, nämlich die Ausmaße der Lösung zu verkleinern, den Wirkungsgrad der Wandlung zu erhöhen, die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) zu verbessern und die Kosten zu senken.

Die einfachste Stromversorgung: der LDO

Eine der einfachsten Arten einer Stromversorgung ist der Low-Dropout-Regler (LDO). LDOs sind im Gegensatz zu Schaltreglern lineare Regler. Linearregler haben einen abstimmbaren Widerstand zwischen der Eingangs- und Ausgangsspannung, was bedeutet, dass die Ausgangsspannung, unabhängig von Änderungen der Eingangsspannung und dem jeweiligen Laststrom, immer auf einen festen Wert eingestellt bleibt. Bild 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau dieses einfachen Spannungswandlers.

Lange Jahre bestand eine typische Stromversorgung aus einem 50-Hz- oder 60-Hz-Transformator, der mit dem Stromnetz verbunden ist und ein bestimmtes Windungsverhältnis hat, um eine nicht geregelte Ausgangsspannung zu erzeugen. Diese lag einige Volt höher als die benötigte Versorgungsspannung im System. Nachgeschaltet wurden Linearregler eingesetzt, um diese Spannung in eine gut geregelte Spannung umzusetzen, wie sie

von der Elektronik benötigt wurde. Bild 2 zeigt die Blockschaltung dieses Konzepts.

Das Problem beim grundsätzlichen Aufbau nach Bild 2 ist, dass der Netztrafo relativ groß und teuer ist. Auch hat der Linearregler eine hohe Verlustleistung mit entsprechender Wärmeentwicklung, so dass bei hoher Systemleistung der Gesamtwirkungsgrad gering und die Wärmeableitung schwierig sind.

Schaltnetzteile kamen zu Hilfe

Um die Nachteile einer Stromversorgung wie in Bild 2 dargestellt zu vermeiden, wurden Schaltnetzteile entwickelt. Sie hängen nicht von der Netzwechselspannung mit 50 Hz oder 60 Hz ab. Sie verwenden eine Gleichspannung, manchmal eine gleichgerichtete Wechselspannung, und generieren daraus eine Wechselspannung mit wesentlich höheren Frequenzen, um einen deutlich kleineren Trafo zu ermöglichen. In nicht isolierten Systemen richten sie die Spannung mit einem LC-Filter gleich, um eine DC-Ausgangsspannung zu generieren. Die Vorteile sind kleine Abmaße und relativ geringe Kosten. Die generierte Wechselspannung muss auch keine Sinusform aufweisen. Ein einfaches PWM-Signal ist bereits gut geeignet und lässt sich einfach mit einem PWM-Generator und einem Schalter erzeugen.

Schnelle Schalt-MOSFETs

Bis zum Jahr 2000 waren bipolare Transistoren die dabei am häufigsten verwendeten Schalter. Sie arbeiteten zuverlässig, hatten aber relativ langsame Schaltgeschwindig-

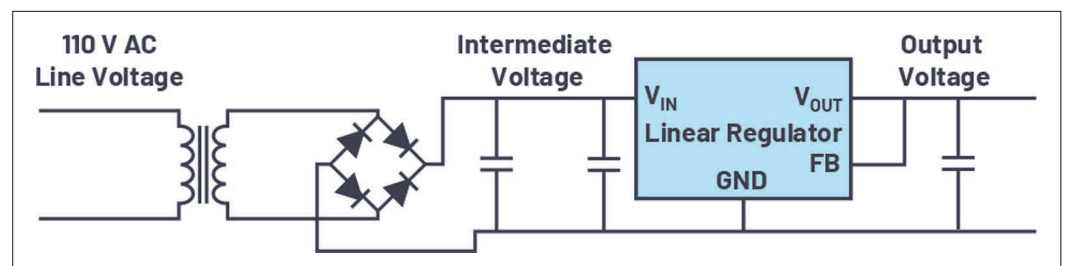


Bild 2: Ein Netztransformator, gefolgt von einem Linearregler

Stromversorgung

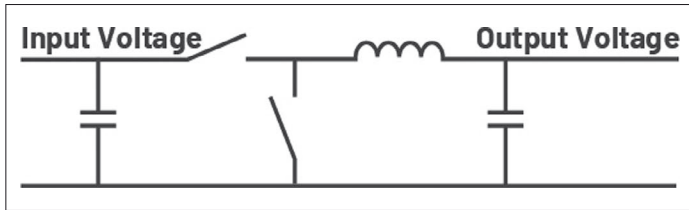


Bild 3: Konzept eines einfachen Abwärtswandlers

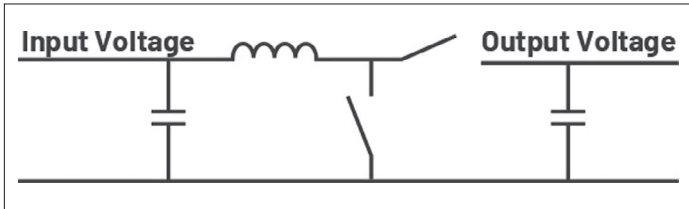


Bild 4: Konzept eines einfachen Aufwärtswandlers

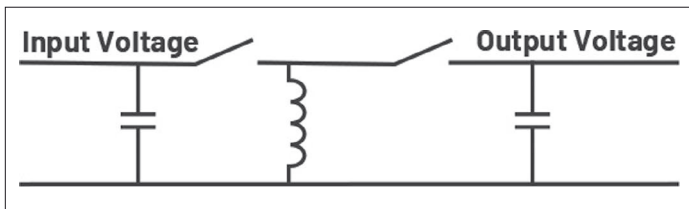


Bild 5: Konzept eines einfachen invertierenden Ab-/Aufwärtswandlers

keiten. Sie waren auch nicht besonders energieeffizient, was die Schaltfrequenzen auf 50 kHz oder vielleicht 100 kHz beschränkte. Heute werden anstatt der Bipolartransistoren normalerweise Schalt-MOSFETs eingesetzt, die deutlich schnellere Schaltvorgänge erlauben. Dies führt wiederum zu geringeren Schaltverlusten, die Schaltfrequenzen von bis zu 5 MHz ermöglichen. Derart hohe Schaltfrequenzen erlauben in der Leistungsstufe die Verwendung von sehr kleinen Spulen und Kondensatoren.

Vorteile der Schaltregler

Schaltregler haben viele Vorteile. Sie haben generell eine effiziente Leistungswandlung und erlauben eine Auf- und Abwärtswandlung der Spannung sowie relativ kompakte und preiswerte Designs. Der Nachteil ist, dass sie nicht so einfach zu entwickeln und zu optimieren sind. Zusätzlich generieren sie beim Schaltvorgang und den Schaltfrequenzen elektromagnetische Interferenzen (EMI). Die Verbesserung der Eigenschaften von Reglern für Schaltnetzteile haben den komplexen Entwicklungsprozess, zusammen mit den Entwicklungswerkzeugen für Stromversorgungen von Ana-

log Devices, wie LTpowerCAD und LTspice, wesentlich vereinfacht. Mit derartigen Werkzeugen lässt sich die Schaltungsentwicklung eines Schaltnetzteils halb automatisieren.

Galvanische Trennung in Stromversorgungen

Bei der Entwicklung einer Stromversorgung ist zuallererst die Frage zu beantworten, ob eine galvanische Trennung nötig ist oder nicht. Es gibt mehrere Gründe die für eine galvanische Trennung sprechen. Sie macht Schaltungen sicherer, erlaubt einen potenzialfreien Systembetrieb und verhindert, dass sich Masseströme über unterschiedliche Bausteine in einer Schaltung ausbreiten und erhöhtes Rauschen verursachen. Die beiden geläufigsten Isolationstopologien sind Sperr- (Flyback) und Durchflusswandler (Forward Converter), wobei für höhere Leistungen noch weitere Trennungstopologien wie Gegentakt-Durchflusswandler (push-pull), Halbbrücken- und Vollbrückenkonfigurationen eingesetzt werden.

Ist keine galvanische Trennung notwendig, wird in den allermeisten Fällen eine nicht-isolierte Topologie verwendet. Isolierte Topologien benötigen immer einen Transformator, der groß und teuer sowie häufig

schwierig als Standardbauteil für die besonderen Anforderungen einer kundenspezifischen Stromversorgungsentwicklung zu erhalten ist.

Die gängigsten Topologien, wenn keine galvanische Trennung nötig ist

Die gängigste Topologie für Schaltnetzteile ist der Abwärtswandler, oder auch Tiefsetzsteller genannt. Er akzeptiert positive Eingangsspannungen und generiert daraus eine Ausgangsspannung, die geringer als die Eingangsspannung ist. Dies ist eine der drei grundlegenden Topologien für Schaltnetzteile die nur zwei Schalter, eine Spule und einen Kondensator benötigen. Bild 3 zeigt den prinzipiellen Aufbau dieser Topologie. Der High-Side-Schalter pulst einen Strom vom Eingang und generiert am Schaltknoten eine Spannung, die zwischen der Eingangsspannung und der Massespannung alterniert. Das LC-Filter übernimmt diese gepulste Spannung am Schaltknoten und erzeugt eine Ausgangs-Gleichspannung. Abhängig vom Tastverhältnis des PWM-Signals, das den High-Side-Schalter steuert, wird ein unterschiedlicher Pegel der Ausgangs-Gleichspannung generiert. Dieser DC/DC-Abwärtswandler hat einen sehr guten Wirkungsgrad, ist einfach aufzubauen und benötigt nur wenige Komponenten.

Der Abwärtswandler pulst den Stromfluss auf der Eingangsseite,

während die Ausgangsseite einen kontinuierlichen Strom aus der Spule aufweist. Dies ist der Grund, warum ein Abwärtsregler auf der Eingangsseite sehr störungsbehaftet ist, aber auf der Ausgangsseite nicht so sehr. Dies muss man wissen, wenn man rauscharme Systeme entwickelt.

Aufwärtswandler

Neben dem Abwärtswandler ist die zweite Basis-Topologie der Aufwärtswandler, oder Hochsetzsteller. Er benutzt dieselben fünf Basis-Leistungskomponenten wie der Abwärtswandler, aber anders angeordnet, so dass die Spule auf der Eingangsseite platziert ist und der High-Side-Schalter auf der Ausgangsseite. Die Aufwärtswandler-Topologie (Bild 4) wird verwendet, um eine Eingangsspannung auf eine Ausgangsspannung zu wandeln, die höher als die Eingangsspannung ist.

Wenn man einen Aufwärtswandler Schaltregler IC wählt, ist es wichtig zu beachten, dass diese in ihren Datenblättern immer den maximalen Schaltstrom spezifizieren und nicht den maximal möglichen Ausgangsstrom. In einem Abwärtswandler hängt der maximale Schaltstrom direkt mit der maximal erreichbaren Ausgangsspannung zusammen, unabhängig vom Verhältnis der Eingangszur Ausgangsspannung. In einem Aufwärtswandler beeinflusst das Spannungsverhältnis den maximal

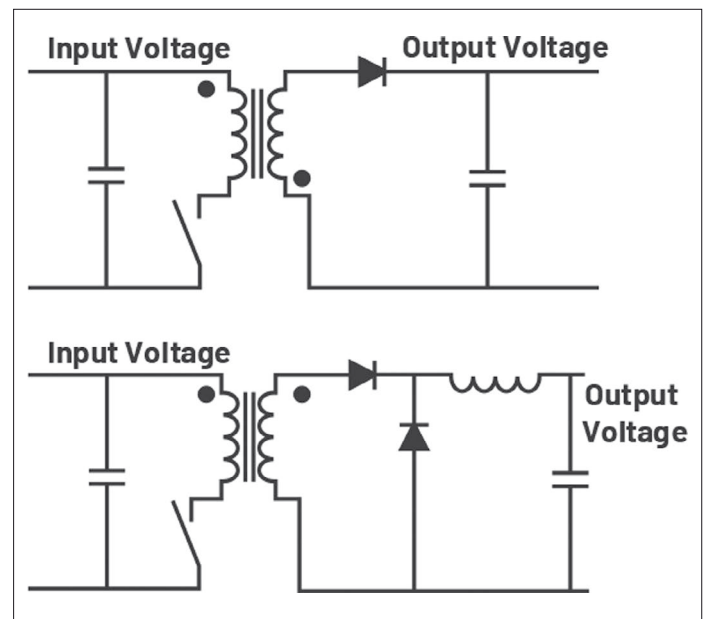


Bild 6: Ein Sperr- (oben) und ein Durchflusswandler (unten)

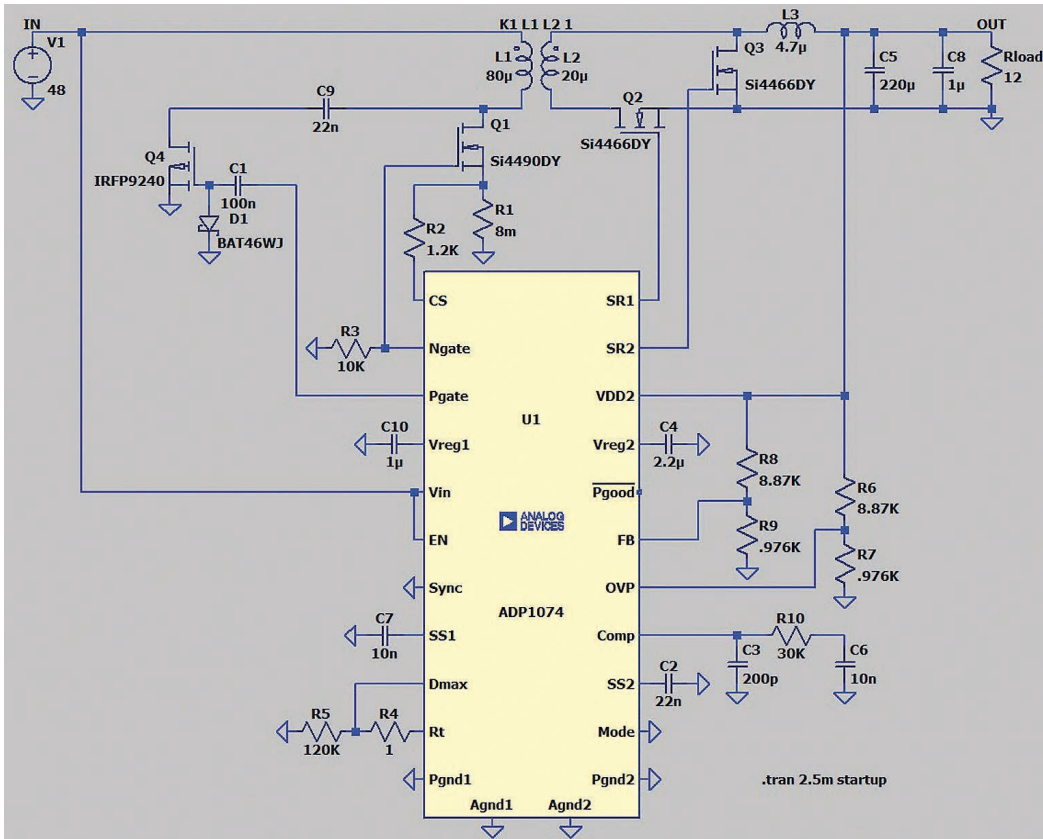


Bild 7: Eine aktive Klemmschaltung mit dem ADP1074 zum Generieren einer isolierten Ausgangsspannung, simuliert in LTspice

möglichen Ausgangsstrom direkt, basierend auf einem festen maximalen Schaltstrom. Wenn man ein geeignetes Aufwärtsregler-IC auswählt, muss man deshalb nicht nur den gewünschten Ausgangsstrom kennen, sondern auch die Ein- und Ausgangsspannung des zu entwickelnden Systems.

Ein Aufwärtswandler ist auf der Eingangsseite sehr rauscharm, da die Spule in Reihe mit der Eingangsverbindung schnelle Änderungen im Stromfluss verhindert. Auf der Ausgangsseite ist diese Topologie jedoch ziemlich stark verrauscht. Es liegt ein gepulster Stromfluss durch den Ausgangsschalter vor. Diese Ausgangsstromwelligkeit verursacht höhere Ausgangsspannungswelligkeit und ist im Vergleich zur Abwärtswandler-Topologie größerer.

Invertierende Ab-/Aufwärtswandler

Die dritte Basis-Topologie, die nur aus den fünf Grundkomponenten besteht, ist der invertierende Ab-/Aufwärtswandler (Buck-Boost). Sein Name ist von der Tatsache abgeleitet, dass er eine positive Ein-

gangsspannung nutzt und diese in eine negative Ausgangsspannung umsetzt. Davon abgesehen kann die Eingangsspannung größer oder kleiner als der Absolutwert der invertierten Ausgangsspannung sein. Eine minus 12-V-Ausgangsspannung kann z. B. aus einer 5-V- oder 24-V-Eingangsspannung generiert werden. Dies ist ohne jegliche speziellen Modifikationen der Schaltung möglich. Bild 5 stellt das prinzipielle Konzept eines invertierenden Ab-/Aufwärtswandlers dar.

In der invertierenden Ab-/Aufwärtswandler-Topologie ist die Spule am Schaltknoten mit Masse verbunden. Sowohl die Eingangs- als auch die Ausgangsseite des Wandlers zeigen einen gepulsten Stromfluss, was diese Topologie auf beiden Seiten ziemlich störungsbehaftet macht. In rauscharmen Anwendungen wird diese Tatsache dadurch kompensiert, dass man zusätzliche Ein- und Ausgangsfilter einsetzt.

Wesentlicher Vorteil

Ein positiver Aspekt der Ab-/Aufwärtswandler-Topologie ist die Tatsache, dass jedes beliebige abwärtsregelnde Schalt-IC für einen solchen

Konverter eingesetzt werden kann. Dazu muss einfach die Ausgangsspannung des Abwärtswandlers mit der Systemmasse verbunden werden. Die Masse des Abwärtswandler-ICs wird dann zur eingestellten negativen Spannung. Diese Eigenschaft führt zu einer großen Auswahl von Schaltregler-ICs auf dem Markt.

Spezielle Topologien

Neben den bisher diskutierten drei nicht-isolierten Topologien für Schaltnetzteile sind noch viele weitere verfügbar. Sie benötigen jedoch alle zusätzliche Leistungskomponenten, was sie verteuert und ihren Wirkungsgrad senkt. Obwohl es einige Ausnahmen gibt, führt das Einfügen zusätzlicher Komponenten in den Leistungsstrang immer zu zusätzlichen Verlusten. Einige der populärsten Topologien sind SEPIC, Zeta, Ćuk und der Ab-/Aufwärtswandler mit vier Schaltern. Jede davon bietet Eigenschaften, die die drei Basis-Topologien nicht haben. Nachfolgend sind die wichtigsten Eigenschaften jeder dieser Topologien aufgelistet:

SEPIC

Ein SEPIC-Wandler kann eine positive Ausgangsspannung aus einer positiven Eingangsspannung generieren, die höher oder niedriger als die Ausgangsspannung sein darf. Aufwärtswandelnde Regler-ICs können eingesetzt werden, um eine SEPIC-Stromversorgung aufzubauen. Der Nachteil dieser Topologie ist, dass man eine zweite Spule oder eine gekoppelte Spule braucht und auch einen SEPIC-Kondensator.

Zeta

Die Zeta-Wandler sind den SEPIC-Wandlern zwar gleich, können jedoch eine positive oder negative Ausgangsspannung erzeugen. Sie haben im Vergleich zu den SEPIC-Wandlern keine RHPZ (right-half-plane zero), was die Regelschleife vereinfacht. Für eine derartige Topologie kann ein Abwärtswandler-IC eingesetzt werden.

Ćuk

Der Ćuk-Wandler konvertiert eine positive Eingangs- in eine negative Ausgangsspannung. Er nutzt dafür zwei Spulen, eine auf der Eingangs- und eine weitere auf der Ausgangsseite, was ihn auf beiden Seiten recht rauscharm macht. Sein Nachteil ist, dass es nicht viele Schaltregler-ICs gibt, die diese Topologie unterstützen, da für die Regelschleife ein separater Pin für die Rückführung der negativen Spannung nötig ist.

Vier-Schalter-Ab-/Aufwärtswandler

Dieser Wandlertyp wurde in den letzten Jahren recht populär. Er liefert eine positive Ausgangsspannung aus einer positiven Eingangsspannung. Die Eingangsspannung kann dabei höher oder niedriger als die eingestellte Ausgangsspannung sein. Dieser Wandler ersetzt viele SEPIC-Designs, da er einen höheren Wirkungsgrad der Wandlung hat und nur eine Spule benötigt.

Die üblichsten isolierten Topologien

Neben den nicht-isolierten Topologien erfordern manche Anwendungen galvanisch getrennte Leistungswandler. Die Gründe können Sicherheitsaspekte berücksichtigen, die Notwendigkeit der Massfreiheit in größeren Systeme

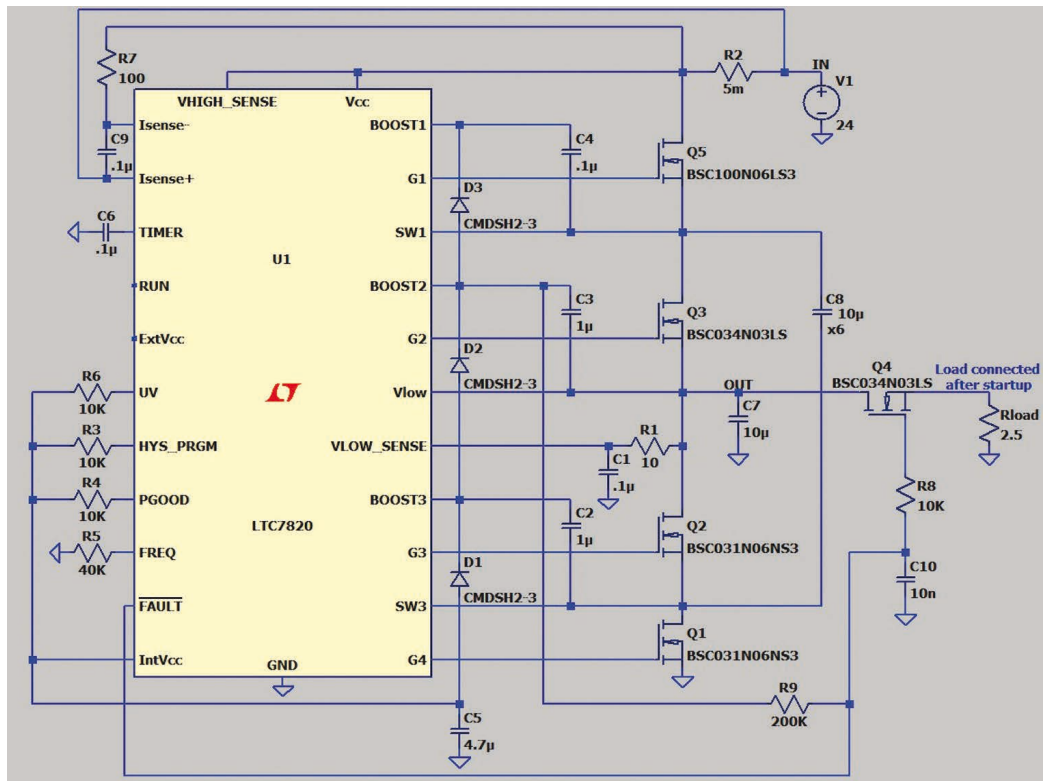


Bild 8: Ein Ladungspumpen-DC/DC-Controller LTC7820 mit festem Wandlungsverhältnis

men erfüllen, in denen unterschiedliche Schaltungen miteinander verbunden sind, oder das Vermeiden von Massestromschleifen in rauschempfindlichen Applikationen sein. Die gängigsten isolierten Konvertertopologien sind der Sperr- (Flyback) und der Durchflusswandler (Forward Converter).

Sperrwandler

Der Sperrwandler wird üblicherweise für Leistungspegel bis zu 60 W eingesetzt. Diese Schaltung arbeitet so, dass während der Ein-Zeit des PWM-Signals, Energie in einem Transformator gespeichert wird. Während der Aus-Zeit wird diese Energie wieder über die Sekundärseite des Trafos abgegeben und versorgt den Ausgang. Dieser Wandler ist einfach aufzubauen, benötigt aber relativ große Trafos, um die nötige Energie für einen einwandfreien Betrieb zu speichern. Dieser Aspekt limitiert diese Topologie auf kleine Leistungspegel. Bild 6 zeigt oben einen Sperrwandler und unten einen Durchflusswandler.

Durchflusswandler

Neben den Sperrwandlern ist auch der Durchflusswandler sehr populär. Er nutzt den Trafo anders

als der Sperrwandler. Während der Ein-Zeit, wenn ein Strom durch die Primärwicklung fließt, gibt es auch einen Stromfluss in der Sekundärwicklung. Dabei sollte aber keine Energie im Kern des Trafos gespeichert werden. Nach jedem Schaltzyklus muss man deshalb sicherstellen, dass jegliche Magnetisierung des Kerns auf null abgebaut ist. Damit kann der Trafo auch nach einer größeren Anzahl von Schaltzyklen nicht in Sättigung gehen. Dieser Energieabbau aus dem Kern kann mit einigen unterschiedlichen Techniken erreicht werden. Eine populäre Methode ist es, eine aktive Klemmung mit einem zusätzlichen kleinen Schalter und Kondensator zu verwenden.

Bild 7 zeigt das Schaltbild für eine aktive Klemmung in einem Durchflusswandler-Design mit dem ADP1074 in der Simulationsumgebung LTspice. Im Durchflusswandler gibt es im Gegensatz zum Sperrwandler eine zusätzliche Spule im Ausgangspfad, wie in Bild 6 zu sehen. Obwohl dies eine zusätzliche Komponente mit entsprechenden Platzanforderungen und zusätzlichen Kosten ist, hilft sie eine, im Vergleich zum Sperrwandler, rauschärmere Ausgangsspannung zu generieren. Auch kann der Trafo, der bei einem Durchflusswandler für den gleichen Leistungspegel wie für den Sperrwandler benötigt wird, wesentlich kleiner sein.

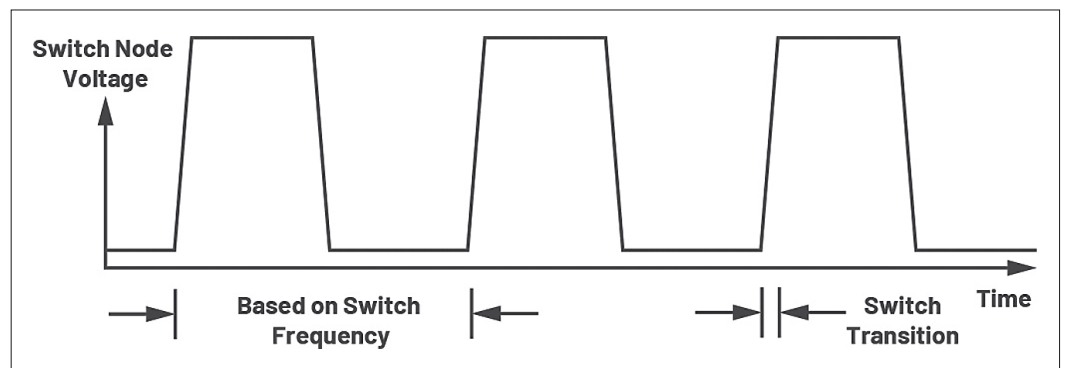


Bild 9: Geschwindigkeit der Schaltübergänge und Schaltfrequenz eines Schaltnetzteils

Fortschrittliche isolierte Topologien

Neben den Sperr- und Durchflusswandlern gibt es noch viele auf Transformatoren basierende galvanisch getrennte Wandlerkonzepte. Die folgende Liste gibt einige sehr grundsätzliche Erklärungen über die gängigsten Wandler.

Gegentakt-Durchflusswandler

Die Gegentakt-Durchflusswandler-Topologie (push-pull) entspricht der des Durchflusswandlers. Aber, anstatt einem Low-Side-Schalter benötigt diese Topologie zwei aktive Low-Side-Schalter. Es ist auch eine Primärwicklung mit Mittelabgriff am Trafo erforderlich. Der Vorteil dieser Topologie ist ein Betrieb mit generell geringerem Rauschen im Vergleich zu einem Durchflusswandler, außerdem ist auch nur ein kleinerer Trafo nötig. Die Hysterese der BH-Kurve eines Trafos wird nicht nur in einem, sondern in zwei Quadranten genutzt.

Halbbrücke/Vollbrücke

Diese beiden Topologien werden üblicherweise für Anwendungen mit höheren Leistungen, meist bei einigen Hundert Watt beginnend bis hinauf zu mehreren Kilowatt, eingesetzt. Sie benötigen zusätzlich zu den High-Side-Schaltern auch noch Low-Side-Schalter, erlauben aber mit relativ kleinen Trafos eine sehr große Leistungsübertragung.

Zero-Voltage-Switching

Dieser Begriff kommt häufig auf, wenn man über isolierte Wandler für hohe Leistungen diskutiert. Er bedeutet Zero-Voltage-Switching ZVS (Schalten bei Spannungs-Nulldurchgang). Eine andere Bezeichnung für diese Converterart ist LLC-

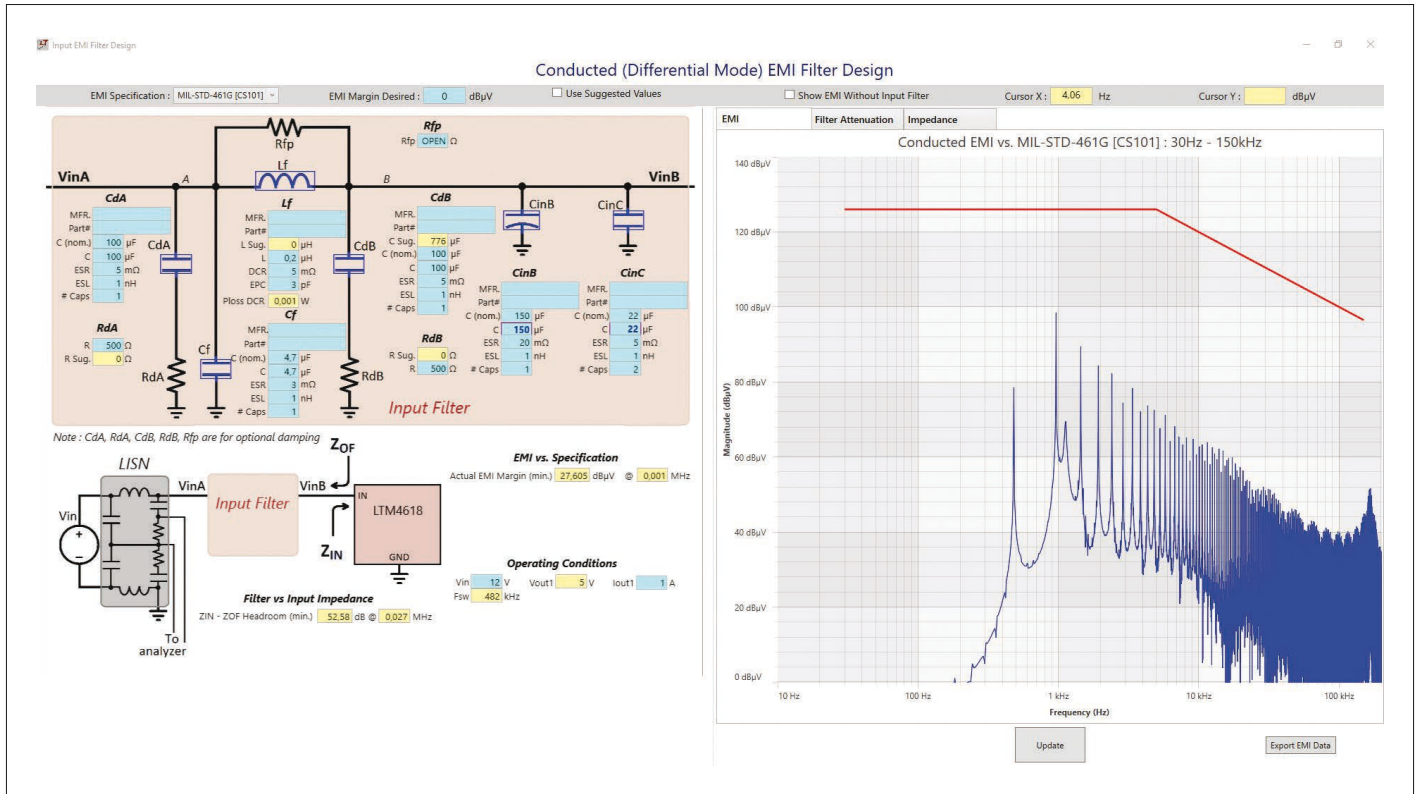


Bild 10: Entwickeln eines Eingangsfilters für einen Abwärtsregler mit LTpowerCAD

Wandler (Spule-Spule-Kondensator). Diese Architekturen zielen auf einen sehr hohen Wirkungsgrad der Wandlung ab. Sie generieren eine Resonanzschaltung und betätigen die Leistungsschalter dann, wenn die Spannung oder der Strom durch die Schalter nahe null ist. Damit werden Schaltverluste minimiert. Diese Konverter können jedoch schwer zu entwickeln sein und die Schaltfrequenz ist auch nicht fest, was manchmal zu EMV-Problemen führt.

Switched-Capacitor-Konverter

Neben den Linearreglern und Schaltnetzteilen existiert noch eine dritte Gruppe von Leistungswandlern: die Switched-Capacitor-Konverter, die auch als Ladungspumpen bezeichnet werden. Sie nutzen Schalter und Kondensatoren, um Spannungen zu vervielfachen oder zu invertieren und haben den großen Vorteil, dass sie überhaupt keine Spulen benötigen. Diese Wandler werden üblicherweise bei geringen Leistungspegeln, unter 5 Watt, eingesetzt. Allerdings erlauben es jüngste Weiterentwicklungen, dass man Switched-Capacitor-Konverter auch für deutlich höhere Leistungspegel verwenden kann. Bild 8 illus-

triert den LTC7820 bei der Wandlung von 48 V auf 24 V in einem 120-W-Design mit 98,5 % Wirkungsgrad.

„Digitale Stromversorgungen“

Alle bisher in diesem Artikel besprochenen Stromversorgungen können sowohl als analoge als auch digitale Stromversorgungen implementiert werden. Was sind aber dann „digitale Stromversorgungen“ wirklich? Denn die Leistung muss über Schalter, Spulen, Trafos und Kondensatoren immer durch eine analoge Leistungsstufe geführt werden. Die digitale Eigenschaft rührt von zwei digitalen Funktionsblöcken her. Der erste ist die digitale Schnittstelle, die es einem System erlaubt, mit einer Stromversorgung zu „sprechen“ und ihr „zuzuhören“. Unterschiedliche Parameter der Stromversorgung für verschiedene Betriebsbedingungen können damit im laufenden Betrieb optimiert werden. Die Stromversorgung kann darüber hinaus auch mit einem zentralen Prozessor kommunizieren und Warnungen sowie Fehlermeldungen ausgeben. Es lässt sich so zum Beispiel von einem System einfach überwachen, ob ein Laststrom einen eingestellten Schwell-

wert überschreitet, oder eine überhöhte Temperatur auftritt.

Digitale Regelschleife

Der zweite digitale Funktionsblock ersetzt die analoge Regelschleife komplett durch eine digitale. Dies kann manchmal zwar erfolgreich funktionieren, aber für die meisten Anwendungen ist es optimal, wenn eine analoge Standard-Regelschleife mit digitalem Zugriff auf einige Parameter erweitert ist. Beispiele dafür sind das Einstellen der Verstärkung des Fehlerverstärkers im laufenden Betrieb oder das dynamische Einstellen der Parameter der Schleifenkompensation, um eine stabile jedoch schnelle Rückkopplungsschleife zu erhalten. Ein Beispiel für einen Baustein mit einer rein digitalen Regelschleife ist der ADP1046A von Analog Devices. Ein Beispiel für einen Abwärtsregler mit einer rein digitalen Schnittstelle und einem analogen Regelkreis, der für digitale Zugriffe optimiert ist, ist der LTC3883.

EMI-Betrachtungen

Elektromagnetische Interferenzen (EMI) sind immer ein wichtiger Punkt, den man bei der Entwicklung eines Schaltnetzteils beachten muss. Der Grund dafür ist, dass Schaltnetzteile

hohe Ströme in sehr kurzen Zeitspannen ein- und ausschalten. Je schneller sie schalten, desto höher ist der Wirkungsgrad des Gesamtsystems. Schnelle Schaltvorgänge reduzieren jedoch die Zeitspanne, zu der ein Schalter eingeschaltet ist. Während diesem Schaltübergang werden die meisten Schaltverluste erzeugt. Bild 9 zeigt die Signalform am Schaltknoten eines Schaltnetzteils. Man stelle sich nun einen Abwärtsregler vor. Die hohe Spannung wird durch den Stromfluss durch den High-Side-Schalter definiert und die untere durch den fehlenden Stromfluss durch den High-Side-Schalter.

In Bild 9 kann man erkennen, dass ein Schaltnetzteil nicht nur Störungen durch die eingestellte Schaltfrequenz erzeugt, sondern auch durch die Schnelligkeit der Schaltübergänge, die eine wesentlich höhere Frequenz aufweisen. Während die Schaltfrequenz üblicherweise zwischen 500 kHz und 3 MHz liegt, können die Schaltübergänge nur wenige Nanosekunden kurz sein. Bei einem Schaltübergang von 1 ns ergibt dies eine korrespondierende Frequenz von 1 GHz im Spektrum. Diese beiden Frequenzen treten meist als abgestrahlte und leistungsgebundene Emissionen auf.

Weitere Frequenzen durch Schwingungen in der Regelschleife oder Interaktionen zwischen der Stromversorgung und möglichen Filtern können ebenfalls noch auftreten.

EMI reduzieren

Es gibt zwei Gründe, warum die EMI reduziert werden sollte. Der erste ist der Schutz der Funktionsfähigkeit des Elektroniksystems, das eine bestimmte Stromversorgung mit Energie versorgt. Ein 16-Bit-A/D-Wandler, der im Signalpfad des Systems benutzt wird, sollte kein Schaltrauschen von der Stromversorgung aufnehmen. Der zweite Grund ist das Einhalten bestimmter Richtlinien zur elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV), die von Regierungen weltweit erlassen wurden, um eine zuverlässige Funktion beim gleichzeitigen Betrieb unterschiedlicher Elektroniksysteme sicherzustellen.

EMI tritt in zwei unterschiedlichen Formen auf: abgestrahlte und leitungsgebundene Emissionen. Die effektivste Art, abgestrahlte Emissionen zu reduzieren ist es, das Leiterplattenlayout zu optimieren und Optimierungstechniken wie Silent-Switcher einzusetzen. Natürlich ist es auch effektiv, die Schaltung in einem abschirmenden Gehäuse unterzubringen, aber dies ist manchmal nicht möglich und in den meisten Fällen auch sehr teuer.

Die leitungsgebundene EMI wird normalerweise mit zusätzlicher Filterung gemindert.

Filterung

RC-Filter sind die üblichen Tiefpassfilter. In einem Stromversorgungssystem sind jedoch nur LC-Filter zu verwenden, da ein Widerstand in Serie zu hohen Verlusten führen würde. Häufig genügt es nur eine Spule in Reihe zu schalten, da dies zusammen mit den Ein- oder Ausgangskondensatoren des Schaltnetzteils ein LC- oder CLC-Filter bildet. Manchmal werden auch nur Kondensatoren als Filter verwendet, aber wenn man die parasitären Induktivitäten von Stromkabeln oder leistungsführenden Leiterbahnen mit in Betracht zieht, bildet man mit einem Kondensator ebenfalls ein LC-Filter. Die Spule L kann einen integrierten Kern oder eine Ferrit-Perle haben. Die Aufgabe des LC-Filters ist es, einen

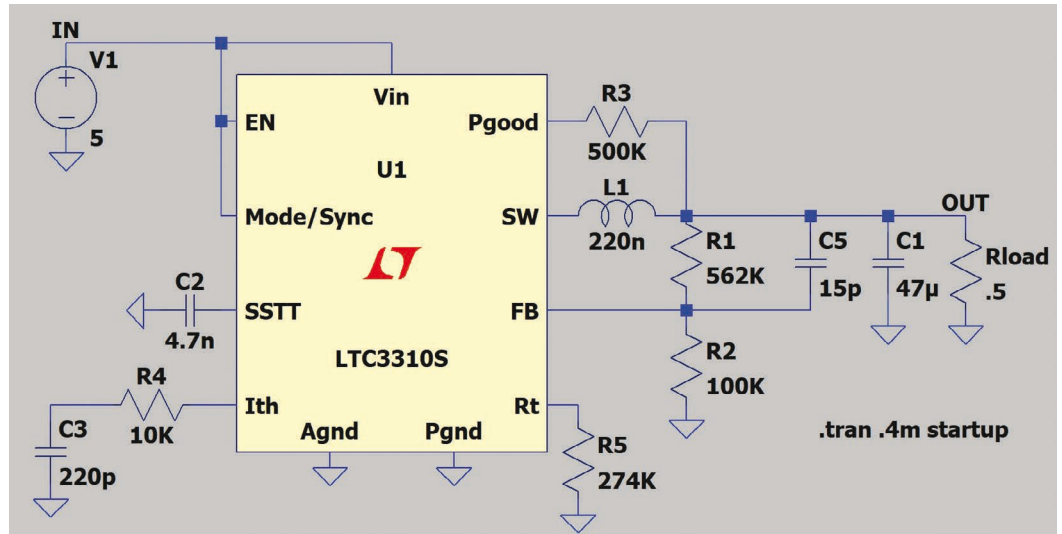


Bild 11: Diese Schaltung mit dem Silent-Switcher-Baustein LTC3310S zeigt nur geringste abgestrahlte Emissionen

Tiefpass zu erzeugen, so dass DC-Leistung fließen kann und Störungen mit höheren Frequenzen zum größten Teil gedämpft werden.

Frequenzdämpfung

Ein LC-Filter hat zwei Pole, so dass man eine Frequenzdämpfung von 40 dB pro Dekade erzielt. Das Filter zeigt auch einen relativ scharfen Abfall. Die Entwicklung eines Filters ist keine große Wissenschaft, weil jedoch auch die parasitären Komponenten der Schaltung, wie die Induktivität der Leiterbahnen, Auswirkungen darauf haben, erfordert das Modellieren von Filtern gleichzeitig auch das der parasitären Hauptnebenwirkungen. Dies kann das Simulieren eines Filters zu einer ziemlich zeitaufwendigen Angelegenheit machen. Viele Entwickler mit Erfahrung in der Filterentwicklung wissen, dass Filter auch früher schon gut funktionierten und sie ein bestimmtes Filter schrittweise für ein neues Design optimieren können.

Verhalten bei kleinen und großen Signalen

In sämtlichen Filterentwicklungen muss man nicht nur das Verhalten bei kleinen Signalen beachten, wie die Übertragungsfunktion eines Filters im Bode-Diagramm, sondern man muss in einem LC-Filter auch die Auswirkungen großer Signale berücksichtigen. In jedem LC-Filter fließt Strom durch die Spule. Dieser Strom wird bei einer plötzlichen Lastspitze am Ausgang nicht mehr benötigt und die in der Spule gespeicherte Energie muss abge-

leitet werden. Sie lädt dann den Kondensator des Filters auf. Ist er jedoch nicht für diesen Extremfall ausgelegt, kann die gespeicherte Leistung Spannungsspitzen hervorrufen, die möglicherweise die Schaltung schädigen.

Und schließlich haben Filter eine bestimmte Impedanz. Diese interagiert mit den Impedanzen der Leistungswandler, die mit dem Filter verbunden sind. Solche Interaktionen können zu Instabilität und Schwingungen führen. Simulationswerkzeuge wie LTspice und LTpowerCAD von Analog Devices sind eine große Hilfe bei der Lösung dieser Probleme und entwerfen ein passendes Filter. Bild 10 zeigt die grafische Benutzerschnittstelle, den Filterdesigner in der Entwicklungsumgebung LTpowerCAD. Mit diesem Werkzeug wird das Filterdesign sehr einfach.

Silent-Switcher-Bausteine

Abgestrahlte Emissionen sind nur schwer zu unterdrücken. Dazu ist eine spezielle Schirmung mit metallischen Materialien nötig. Dies kann sehr kostenintensiv sein. Daher suchen Ingenieure seit langem nach Wegen, um die von Schaltnetzteilen generierten abgestrahlten Emissionen zu reduzieren. Vor einigen Jahren wurde dafür mit der Silent-Switcher-Technik ein großer Durchbruch erzielt. Durch das Vermindern der parasitären Induktivitäten in der „heißen Schleife“ eines Schaltnetzteils und verteilen dieser heißen Schleifen auf zwei symmetrisch angeordnete, heben sich die meisten abgestrahlten Emissionen

gegenseitig auf. Heute sind viele Silent-Switcher-Bauteile am Markt verfügbar, die wesentlich geringere Emissionen abstrahlen als ihre Vorgängermodelle. Das Reduzieren der abgestrahlten Emissionen erlaubt es, die Geschwindigkeit der Schaltflanken ohne ernsthafte EMV-Probleme zu steigern. Durch die steileren Schaltflanken reduzieren sich Schaltverluste, was wiederum höhere Schaltfrequenzen ermöglicht. Ein Beispiel für diese Innovation ist der LTC3310S, der mit 5 MHz Schaltfrequenz arbeiten kann, was extrem kompakte Designs mit nur wenigen preiswerten externen Komponenten erlaubt.

Power-Management

Das Power-Management ist notwendige Angelegenheit, kann aber auch erfreulich sein. In diesem Artikel wurden viele Aspekte der Entwicklung von Stromversorgungen beleuchtet, wie die unterschiedlichen Stromversorgungs-Topologien mit ihren jeweiligen Vor- und Nachteilen. Für die Entwickler von Stromversorgungen mögen diese Informationen nur sehr grundsätzlich sein, aber sowohl für Experten als auch Nichtfachleute ist es hilfreich, Software-Werkzeuge wie LTpowerCAD und LTspice als Hilfsmittel in ihren Entwicklungsprozessen zu haben. Mit diesen Werkzeugen können Leistungswandler in sehr kurzer Zeit entwickelt und optimiert werden. Vielleicht inspiriert dieser Artikel ja dazu, sich auf die nächste herausfordernde Entwicklung einer Stromversorgung zu freuen. ◀