

APPLICATION NOTE



Sicheres, zuverlässiges Design Nichtisolierter Offline-Wandler mit 400 V_{DC} Hochvolt Speicherdrosseln

ANP021 VON CHRISTOPHER RICHARDSON

1. Einleitung

Zwar bietet die Mehrzahl der AC-Offline-Wandler und Schaltwandler, die mit (nach Definition von Sicherheitsstandards wie IEC-60950) gefährlichen Spannungen von über 60 V_{DC} betrieben werden, aus Sicherheitsgründen eine galvanische Trennung, doch gibt es auch zahlreiche Anwendungen, bei denen nichtisolierte Schaltungen verwendet werden können. Dort, wo Benutzer und Wartungspersonal mechanisch vor einem Kontakt mit gefährlichen Spannungen geschützt sind oder sowohl Eingangs- als auch Ausgangsspannung sich auf der Primärseite eines isolierten Wandlers befinden, sind Buck- und Buckboost-Wandler häufig effizienter, benötigen weniger Leiterplattenfläche und kosten in der Implementierung weniger als Sperrwandler. Sperrwandler sind zweifelsohne die kostengünstigste Option für isolierte Schaltungen und können natürlich auch nichtisoliert sein. Allerdings ist für den Sperrwandler sogar bei Leistungen von 5 W und darunter ein Sperrwandler Übertrager mit variablen Wicklungsverhältnissen, je nach Eingangs- und Ausgangsspannung, Ausgangstrombereich und Schaltfrequenz, erforderlich. Würth Elektronik eiSos hat verschiedene Produktreihen mit gebrauchsfertigen Sperrwandler Übertrager im Sortiment. Wenn eine Isolierung der Schaltung nicht notwendig ist, bieten sich Buck- und Buckboost-Wandler an, für die es eine wesentlich größere Auswahl an Speicherdrosseln gibt, die zudem häufig kostengünstiger sind.

2. Drei allgemeine Topologien

Die Abbildungen 1a, 1b und 1c zeigen drei Topologien, bei denen herkömmliche Speicherdrosseln zur Energiespeicherung in Offline-Schaltungen bei universeller AC-Eingangsspannung (85-265 V_{AC}) bzw. europäische Netzspannung (195-265 V_{AC}) zum Einsatz kommen. Hierbei nähert sich die Spitzengleichspannung nach der Gleichrichtung einem Wert von 400 V_{DC} an. Anders als bei zum Filtern verwendeten Drosseln, sehen die Speicherdrosseln in diesen drei Schaltungen Differenzspannungen, die die Größenordnung der Spitzeneingangsspannung entsprechen oder sogar übertreffen. Würth Elektronik eiSos bietet drei Produktreihen an Speicherdrosseln mit insgesamt sechs Baugrößen in geschirmter und ungeschirmter Oberflächenmontage- wie auch Durchsteckmontagetechnologie an, die speziell für den sicheren Betrieb bei Differenzspannungen bis 400 V_{DC} ausgelegt sind.

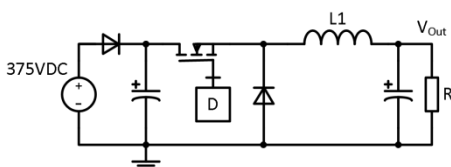


Abb. 1a: Buck-Wandler

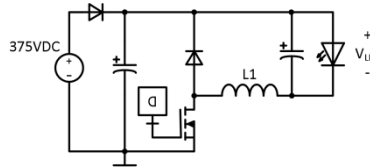


Abb. 1b: „Potenzialfreier“ Buck-Wandler

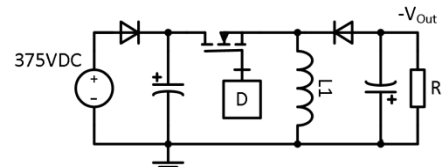


Abb. 1c: Buckboost-Wandler

Abbildung 1a zeigt einen Standard-Buck-Wandler mit einem Einweggleichrichter, der die Verwendung des Nullleiters der AC-Eingangsspeisung als Bezugs Erde verwendet. Die Ausgangsspannung V_{Out} und die Eingangsspannung verwenden wie bei nichtisolierten Gleichspannungswandlern und niedrigen Spannungen üblich, dieselbe Bezugs Erde. Dies macht diese Schaltung ideal für die Erzeugung von Betriebsspannungen für ICs, die auf der Primärseite eines AC/DC-Wandlers massebezogen sind; dies gilt für analoge Schaltungen wie Netzteilsteuerungen und Gate-Treiber ebenso wie für Mikrocontroller und Interfaceschaltungen. Der wesentliche Nachteil eines normalen Buck-Wandlers, der bei 400 V_{DC} betrieben werden kann, besteht darin, dass der Steuerschalter potenzialfrei ist („in the high side“). Die Fläche des Siliziumchips (und daher auch die Kosten) machen die Verwendung von N-Kanal-MOSFET-Schaltern unumgänglich, weswegen der Steuer-IC

APPLICATION NOTE



Sicheres, zuverlässiges Design Nichtisolierter Offline-Wandler mit 400 V_{DC} Hochvolt Speicherdrosseln

entweder Hochspannungsilizium verwenden oder eine Schaltung zur Potenzialverschiebung integrieren muss. Verschiedene Hersteller bekannter Power-Management-ICs bieten nun kombinierte Steuer- und HV MOSFET-Chips an, die die Steuerung und Potenzialverschiebung erheblich vereinfachen und diese Topologie so in den Bereich des Möglichen bringen.

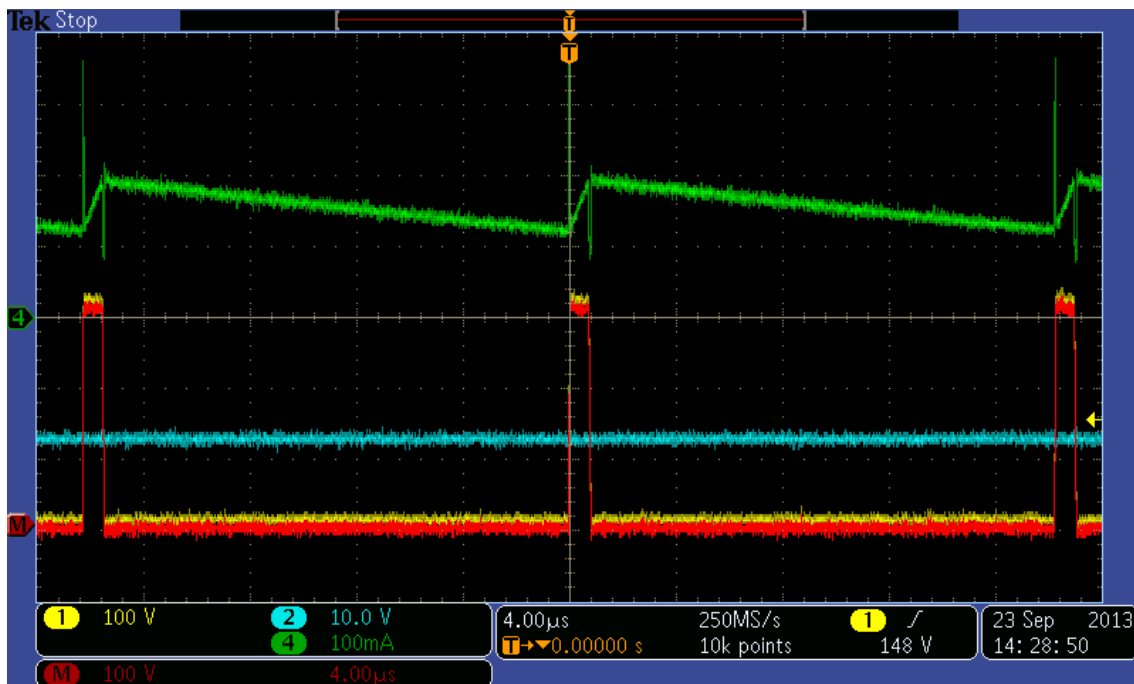


Abbildung 2: HV-Buck-Wandler im CCM mit $L_1 = 3,3 \text{ mH}$. $V_{IN} = 230 \text{ V}_{\text{eff}}$, $V_{OUT} = 12 \text{ V}$, $I_O = 150 \text{ mA}$

K.1 (gelb) = Schaltknoten, K.2 (blau) = V_{OUT} K.M (rot) = Δv_{L1} , K.4 (grün) = I_{L1}

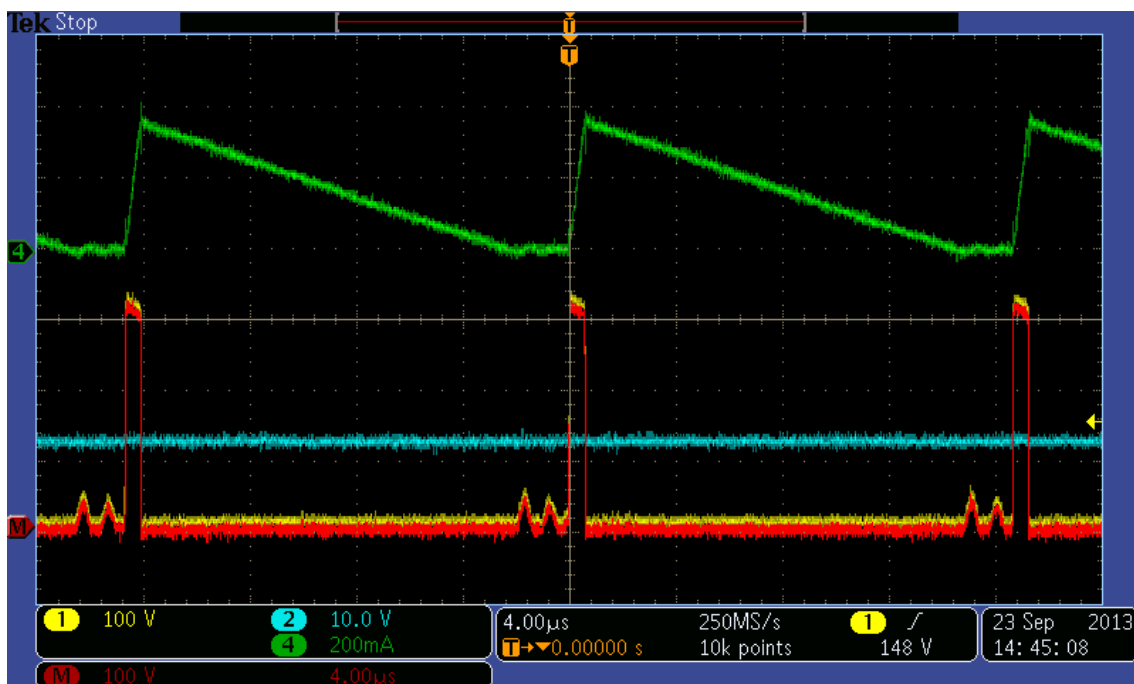


Abbildung 3: HV-Buck-Wandler im DCM mit $L_1 = 470 \mu\text{H}$. $V_{IN} = 230 \text{ V}_{\text{eff}}$, $V_{OUT} = 12 \text{ V}$, $I_O = 150 \text{ mA}$

K.1 (gelb) = Schaltknoten, K.2 (blau) = V_{OUT} K.M (rot) = Δv_{L1} , K.4 (grün) = I_{L1}

APPLICATION NOTE



Sicheres, zuverlässiges Design Nichtisolierter Offline-Wandler mit 400 V_{DC} Hochvolt Speicherdrosseln

Abbildung 1b zeigt eine alternative Buck-Wandlertopologie, bei der der Steuerschalter massebezogen ist. Grundsätzlich ist diese Topologie aufgrund des leichteren Antriebs eines massebezogenen N-MOSFET-Schalters einfacher zu implementieren. Es können dieselben kombinierten Steuer- und HV MOSFET-Geräte verwendet werden, von denen einige eine Eingangsspannung von 400 V_{DC} direkt bewältigen können, während andere eine Niederspannungsversorgung für ihre Steuerbereiche benötigen, die sich normalerweise im Bereich zwischen 12 und 24 V_{DC} bewegt und mit einem diskreten Linearregler erzeugt wird.

Diese Topologie ist ein „negativer Buck-Wandler“, der zur Abwärtsstellung einer negativen Eingangsspannung auf eine negative Spannung mit niedrigerem Absolutwert verwendet wird. Wird hingegen eine positive Eingangsspannung angelegt (siehe Abbildung 1b), dann spricht man von einem „potenzialfreien“ oder auf die Eingangsspannung bezogenen Buck-Wandler, was der Tatsache geschuldet ist, dass die Ausgangsspannung bezogen auf Eingangsschiene gesteuert wird. Die beiden wesentlichen Anwendungen für diese Topologie sind der Einsatz als Stromquellen für LED-Treiber und die Verwendung als Spannungsregler für Systeme mit niedriger Leistungsaufnahme, bei denen keine andere Schaltung auf Primärseite einen Massebezug benötigt. Ein gutes Beispiel wäre ein kleines netzspannungsbetriebenes Kommunikationsgerät, bei dem der Mikrocontroller und eine isolierte Interfaceschaltung beide über die in Abbildung 1b als „V_{LED}“ gekennzeichnete Spannung betrieben werden.

Abbildung 1c zeigt einen Buckboost-Wandler, der eine negative Ausgangsspannung bezogen auf die negative Eingangsschiene entwickelt. Typische Anwendungen für eine solche Topologie sind etwa negative Spannungen für den Betrieb von Operationsverstärkern und auch für die Steuerung von Triacs, mit denen die Netzspannung bei Schaltungen auf der Primärseite ein- bzw. ausgeschaltet werden.

Zwei Details, die bei Buckboost-Wandlerschaltungen Aufmerksamkeit beanspruchen, sind die zusätzliche Spannungsbeanspruchung in MOSFET, Ausgangsdiode und Spule in einer Größenordnung von $V_{INPK} + |V_O|$ und zudem der un stetige hohe Effektivstrom am Ausgangskondensator, der dem am Ausgang in einem Sperrwandler ähnelt.

3. Kriechstrecke und Luftstrecke bei nichtisolierten Anwendungen

Sicherheitsstandards wie IEC-60950 sind in ihren Aussagen zu Luft- und Kriechstrecken zwischen isolierten Primär- und Sekundärschaltungen, zwischen dem Netzspannungs- und dem Neutralleiter und zwischen diesen Punkten und der Schutzerdung ziemlich eindeutig. In Bezug auf andere Spannungen sind die meisten Standards deutlich schwieriger zu interpretieren, beispielsweise bei den positiven und negativen Ausgängen eines Diodengleichrichters, die die Eingangsspannung von AC-Offline-Schaltungen bilden. Die Isolierungskategorie für Spannungsknoten in nichtisolierten Schaltungen ist die Funktionstrennung, d. h., der Abstand zwischen den Knoten ist stets ausreichend groß, um eine ordnungsgemäße Funktion zu gewährleisten. Eine gängige Vorgehensweise zur Festlegung von Richtlinien für das Leiterplattenlayout und zur Bewertung des physischen Aufbaus einer Speicherdrossel besteht darin, einen Einschwingspannungstests durchzuführen und zu kontrollieren. Beispielsweise wird bei IEC-60950-kompatiblen Geräten, die mit Spannungen bis zu 300 V_{ACeff} betrieben werden, mit 1500-V_{DC}-Impulsen getestet, wenn es sich um Klasse-1-Geräte mit Schutzerde handelt, oder mit 2500 V_{DC} bei Klasse-2-Geräten ohne Schutzerde. 300 V_{ACeff} schließt die Mehrzahl der AC- und HVDC-Anwendungen ein, bei denen nichtisolierte Buck- und Buckboost-Wandler mit niedriger Leistungsaufnahme verwendet werden. Ein Durchschlag zwischen Leiterplatten lässt sich in den meisten Feuchtigkeits-, und Verunreinigungsclassen vermeiden, wenn eine Luftstrecke von 1 mm je 1600 V_{DC} eingehalten wird. (Dies wird von der UL auch empfohlen.) Zahlreiche Netzteilkonstruktionen verwenden Klasse-2-Bewertungen der Kriech- und Luftstrecken auch dann, wenn sie aus sicherheitstechnischen Erwägungen eigentlich zur Klasse 1 gehören. Deswegen sollte zur Durchschlagvermeidung bei Einschwingspannungstests mit 2500 V_{DC} ein Abstand von mindestens ca.

APPLICATION NOTE



Sicheres, zuverlässiges Design Nichtisolierter Offline-Wandler mit 400 V_{DC} Hochvolt Speicherdrosseln

1,6 mm zwischen den Pads oder Anschlüssen der Spule eingehalten werden. Bei allen drei in Abbildung 1 gezeigten Topologien ist eine Seite der Spule mit einer festen Spannung verbunden, während die andere Seite häufig als „Schaltknoten“ bezeichnet wird, weil ihre Spannung sich zwischen null und V_{IN} (beim Buck- bzw. beim potenzialfreien Buck-Wandler) bzw. zwischen null und $(V_{IN} + |V_O|)$ beim Buckboost-Wandler hin und her schaltet. Wird ein Abstand von 1,6 mm vom Schaltknoten zu den anderen Knoten in der Schaltung eingehalten, so ist dies nicht nur zur Durchschlagsvermeidung bei Einschwingspannungstests praktisch, sondern reduziert auch die kapazitive Kopplung und ist besonders nützlich zur Verringerung von Gleichtaktstörungen, sofern Leiterbahnen oder Lagen mit Erdung auf der Leiterplatte vorhanden sind.

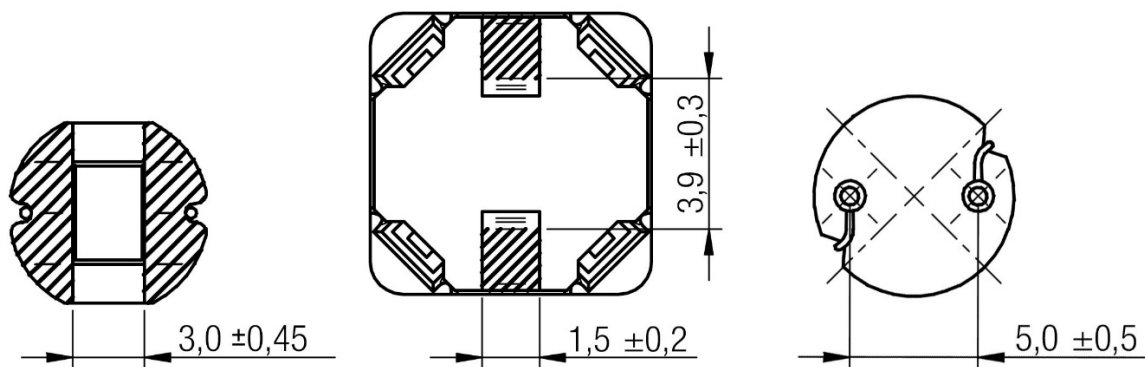


Abbildung 4: Luftstrecken zwischen Pads bzw. Drähten bei den Baureihen WE-PD2 HV, WE-PD HV und WE-TI HV

Abbildung 4 stellt das jeweils kleinste Mitglied der drei HV-Drosselbaureihen dar und zeigt, dass bei jedem dieser Bauteile mehr Luftstrecke als genug zwischen den elektrischen Verbindungen vorhanden ist, um ein Durchschlagen bei 2500 V_{DC} zu verhindern. Die Magnetkerne der Drosseln (und Transformatoren) sind leitfähige Komponenten im Sinne von IEC-60950 und deswegen der Kategorie „Funktionstrennung“ zugeordnet.

4. Gefahren bei der Verwendung von Standarddrosseln

Es ist gängige Praxis, Speicherdrosseln derselben Baureihe für Durchsteck- und Oberflächenmontageanwendungen sowohl als Energiespeicherelemente in DC/DC-Niederspannungsanwendungen (unter 60 V_{DC}) als auch als Eingangs- und Ausgangsfilter in Offline-Anwendungen einzusetzen. Ein wesentlicher, als auch häufig übersehener Faktor bei diesen beiden Anwendungen besteht in der Nennspannung der Drosseln. Tatsächlich ist die Nennspannung bei der großen Mehrheit aller Speicherdrosseln nicht in den Datenblättern angegeben. Hersteller hochwertiger Komponenten können diese Angabe auf Anfrage bereitstellen, oder sie geben Informationen zur Stärke der aufgetragenen Lackschicht oder zu anderen Details des mechanischen Aufbaus an. Allerdings ist die Zeit, die für die Berechnung der Spannung benötigt wird, die eine gegebene Drossel aushalten kann, mit den rasanten Konstruktionszyklen unserer Zeit überhaupt nicht in Einklang zu bringen.

Wenn bei der Konstruktion von Schaltungen die Zeit drängt, könnte man versucht sein, Standardspeicherdrosseln zu verwenden. Abbildung 5 zeigt jedoch die unschönen Folgen, die bei Verwendung solcher Komponenten in HV-Anwendungen auftreten können: Durchbruch des Isolierlacks, Kurzschlüsse zwischen benachbarten Wicklungen – kurz: Ausfälle eines Bauteils, das normalerweise zu den robustesten eines Schaltwandlers gehört. Eine kurzgeschlossene Drossel – und zwar vor allem eine, bei der es während des Schaltzyklus zu einem Kurzschluss zwischen Netz- und Nullleiter kommt – stellt grundsätzlich ein Sicherheitsrisiko für Bediener und Wartungspersonal dar. Für Stromschläge, Verletzungen oder womöglich sogar Todesfälle, die infolge dessen auftreten, kann der Hersteller des Endproduktes haftbar gemacht werden.

APPLICATION NOTE



Sicheres, zuverlässiges Design Nichtisolierter Offline-Wandler mit 400 V_{DC} Hochvolt Speicherdrosseln

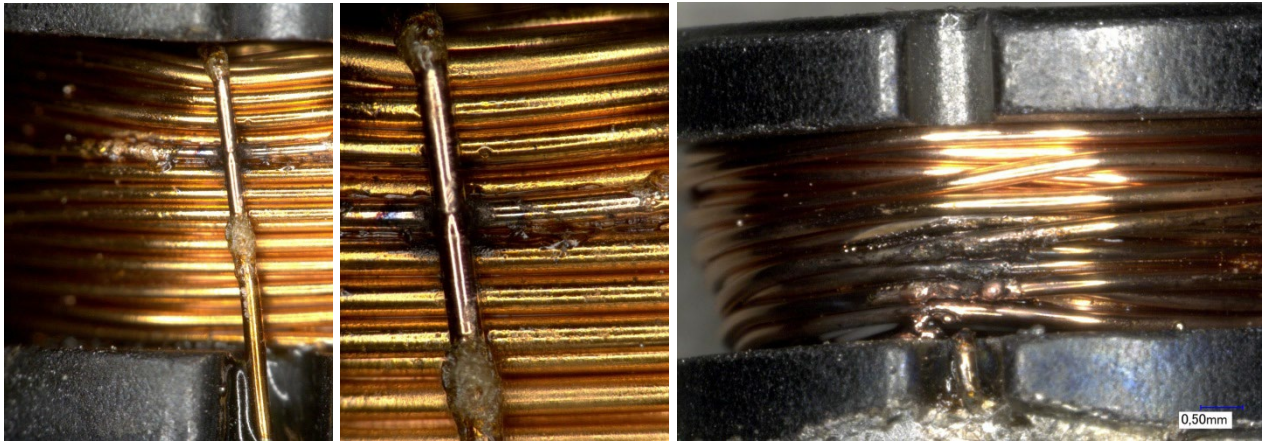


Abbildung 5: Durchschlag und Kurzschlüsse aufgrund von Überspannung bei einer Standardspeicherdrossel

Bei Speicherdrosseln der Baureihen WE-PD HV, WE-PD2 HV und WE-TI HV garantiert Würth Elektronik eiSos gemäß internem Standard 1516 einen ordnungsgemäßen Betrieb bis 400 V_{DC}. Diese Garantie gilt auch noch nach drei Reflow-Vorgängen – etwas Umfassenderes in Sachen Gewährleistung bietet kein anderer Hersteller weltweit.

5. Konstruktionsbeispiele für den kontinuierlichen Modus (CCM)

Ein Betrieb im CCM (Continuous Conduction Mode), in dem der Spulenstrom während des gesamten Schaltzyklus stets über Null bleibt, bietet den Vorteil niedrigerer Effektivströme nicht nur in der Drossel selbst, sondern auch in allen anderen Bauteilen des Versorgungsstrangs. Niedrigere Effektivströme haben eine geringere Verlustleistung, niedrigere Betriebstemperaturen und weniger elektromagnetische Störungen (EMI) zur Folge. Der wesentliche Nachteil ist die hohe erforderliche Induktivität, die wiederum die Verwendung physisch größerer Drosseln notwendig macht, die aber als Katalogprodukte überhaupt nicht erhältlich sind. Die unten beschriebenen Konstruktionsbeispiele erfüllen die folgenden Anforderungen und verwenden dazu den IC ViPER16L von ST Microelectronics:

Buck und potentialfreier Buck

V_{IN} = 360 V bis 400 V

V_{OUT} = 12,0 V, Δv_O = 120 mV_{P-P}

I_{O-MAX} = 200 mA, stetig

Schaltfrequenz f_{SW} = 60 kHz

P_{OUT} = 2,4 W

Buckboost Wandler

V_{IN} = 360 V bis 400 V

V_{OUT} = -12,0 V, Δv_O = 120 mV_{P-P}

I_{O-MAX} = 200 mA, stetig

Schaltfrequenz f_{SW} = 60 kHz

P_{OUT} = 2,4 W

5.1. Die Speicherinduktivität

Magnetische Bauteile bilden das Herz jedes Schaltwandlers und liefern in diesem Beispiel 2,4 W, mit denen ein Vollbrückenwandler mehrere Kilowatt Leistung bereitstellt. Abseits der Topologie besteht die gängigste Vorgehensweise zur Auswahl der erforderlichen Induktivität im CCM in der Angabe eines die Spule durchfließenden Ripplestroms Δi_L als prozentualen Anteil des maximalen durchschnittlichen Spulenstroms I_{L-MAX}. Wenn man Δi_L auf einen Wert von 20 % bis 40 % von I_{L-MAX} setzt, kommt man zu einem guten

APPLICATION NOTE



Sicheres, zuverlässiges Design Nichtisolierter Offline-Wandler mit 400 V_{DC} Hochvolt Speicherdrosseln

Kompromiss, der sich bei zahllosen Schaltwandlerkonstruktionen bewährt hat. Man erzielt so ein ausgewogenes Verhältnis zwischen der Größe (ein höherer Ripplestrom erfordert weniger Induktivität und folglich kleinere Drosseln) und Effizienz/Störungen (kleinere Rippleströme führen zu niedrigeren Effektivströmen und weniger EMI).

Bei Buck-Wandlern gilt $I_{L-MAX} = I_{O-MAX}$, wobei die potenzialfreie Variante genau die gleiche Konstruktionsgleichung wie der Standard-Buck-Wandler aufweist. Bei Buckboost-Wandlern ist der durchschnittliche Spulenstrom eine Funktion von Tastgrad und Ausgangsstrom. Die Gleichungen erster Ordnung für eine Welligkeit von 30 % lauten:

Buck und potentialfreier Buck

$$D_{CCM-B} = \frac{V_{OUT}}{V_{IN-MIN}} = \frac{12}{360} = 0,033 \quad (1)$$

$$I_{L-MAX} = I_{O-MAX} = 0,2 \text{ A} \quad (3)$$

$$\Delta i_L = 0,3 \cdot I_{L-MAX} = 0,06 \text{ A}_{P-P} \quad (5)$$

$$L_{min, Buck} = D_{CCM-B} \frac{V_{IN-MIN} - V_{OUT}}{\Delta i_L \cdot f_{SW}} \quad (7)$$

$$L_{min, Buck} = 0,033 \frac{360 \text{ V} - 12 \text{ V}}{0,06 \text{ A} \cdot 60 \text{ kHz}}$$

$$L_{min, Buck} = 3,2 \text{ mH}$$

Buckboost Wandler

$$D_{CCM-BB} = \frac{|V_{OUT}|}{V_{IN-MIN} + |V_{OUT}|} = \frac{12}{360 + 12} = 0,032 \quad (2)$$

$$I_{L-MAX} = \frac{I_{O-MAX}}{1 - D_{CCM-BB}} = \frac{0,2 \text{ A}}{0,968} = 0,206 \text{ A} \quad (4)$$

$$\Delta i_L = 0,3 \cdot I_{L-MAX} = 0,06 \text{ A}_{P-P} \quad (6)$$

$$L_{min, Buckboost} = D_{CCM-B} \frac{V_{IN-MIN} - V_{OUT}}{\Delta i_L \cdot f_{SW}} \quad (8)$$

$$L_{min, Buckboost} = 0,032 \frac{360 \text{ V}}{0,06 \text{ A} \cdot 60 \text{ kHz}}$$

$$L_{min, Buckboost} = 3,2 \text{ mH}$$

Der nächsthöhere E12-Wert beträgt 3,3 mH und wird als L1 bezeichnet. Wenn dieser Wert ausgewählt ist, lassen sich der tatsächliche Ripplestrom der Drossel und dann auch der Spitzenspulenstrom I_{L-PK} berechnen:

Buck und potentialfreier Buck

$$\Delta i_{L-Buck} = D_{CCM-B} \frac{V_{IN-MIN} - V_{OUT}}{L_1 \cdot f_{SW}} \quad (9)$$

$$\Delta i_{L-Buck} = 0,033 \frac{360 \text{ V} - 12 \text{ V}}{3,3 \text{ mH} \cdot 60 \text{ kHz}}$$

$$= 0,058 \text{ A}_{P-P}$$

$$I_{L-PK} = I_L + \frac{\Delta i_L}{2}$$

(bei Buck- und Buckboost-Wandler identisch)

$$I_{L-PK, Buck} = 0,2 \text{ A} + \frac{0,058 \text{ A}}{2} = 0,23 \text{ A}$$

Buckboost Wandler

$$\Delta i_{L-Buckboost} = D_{CCM-B} \frac{V_{IN-MIN}}{L_1 \cdot f_{SW}} \quad (10)$$

$$\Delta i_{L-Buckboost} = 0,032 \frac{360 \text{ V}}{3,3 \text{ mH} \cdot 60 \text{ kHz}}$$

$$= 0,058 \text{ A}_{P-P}$$

(11)

$$I_{L-PK, Buck} = 0,206 \text{ A} + \frac{0,058 \text{ A}}{2} = 0,24 \text{ A}$$

Wenn Induktivität sowie Durchschnitts- und Spitzenstrom berechnet sind, lassen sich die geeigneten Drosseln aus dem Würth Elektronik eiSos Katalog auswählen. In diesem Beispiel bietet sich das Modell 7687709332 aus der Baureihe WE-PD HV an: eine geschirmte Bauform mit 3,3 mH, die speziell für 400-V_{DC}-Anwendungen ausgelegt ist, mit einem Effektivnennstrom von 0,37 A sowie einem Spitzennennstrom von 0,52 A. Die Komponente ist zur Oberflächenmontage geeignet und bietet sich vor allem für doppelseitige Leiterplatten an, auf denen bereits andere SMD-Schaltungen vorhanden sind. Bei kostengünstigeren Anwendungen werden zwar häufig einseitige Leiterplatten und eine reine Durchsteckmontage bevorzugt, doch wird der prinzipielle Nachteil des CCM-Betriebs in diesem Fall deutlich: Es sind schlicht keine HV-Durchsteckkomponenten für 3,3 mH erhältlich.

APPLICATION NOTE



Sicheres, zuverlässiges Design Nichtisolierter Offline-Wandler mit 400 V_{DC} Hochvolt Speicherdrosseln

5.2. Die CCM-DCM-Grenze

Die obigen Beispielschaltungen können bei niedrigen Induktivitätswerten durchaus im CCM betrieben werden. Die WE-TI HV-Baureihe 768772x umfasst hierfür eine 2,2-mH-Komponente (768772222), die für einen Durchschnitts- wie auch Spitzenstromwert von 0,32 A ausgelegt ist und perfekt funktionieren wird – wenn auch mit einem höheren Peak-to-Peak-Rippelstrom. Der tatsächliche Grenzwert ist erreicht, nach dessen Überschreiten ein CCM-Betrieb nicht mehr möglich ist, wenn der Peak-to-Peak-Rippelstrom exakt dem Doppelten des Spulenstroms entspricht (Abbildung 6). Beachten Sie, dass das Erfassen von Nullstellen beim Spulenstrom aufgrund einer Kombination aus Schaltfrequenz-Jitter und Eingangsspannungsrippel schwierig ist, weil die Schaltung die DCM-CCM-Grenze bei jedem Zyklus erst unter- und dann wieder überschreitet.

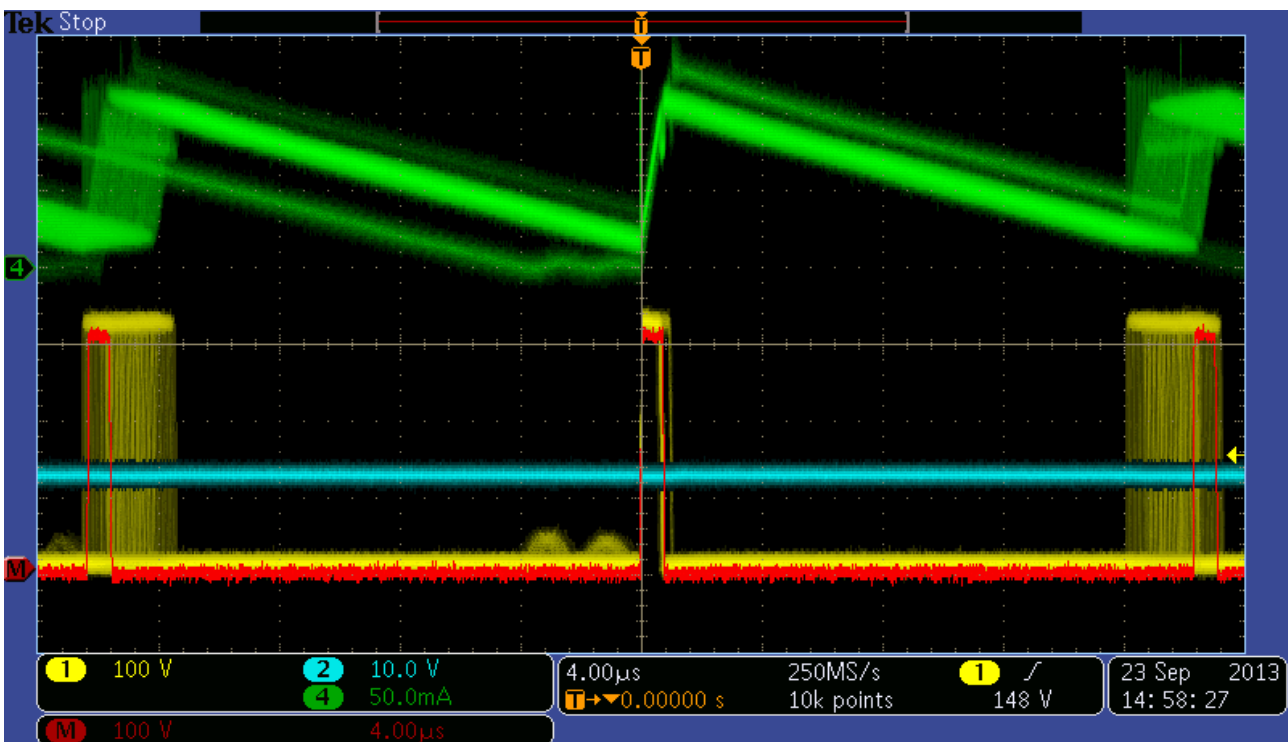


Abbildung 6: HV-Buck-Wandler an der CCM-DCM-Grenze mit $L_1 = 2,2$ mH. $V_{IN} = 230$ V_{eff}, $V_{OUT} = 12$ V, $I_O = 57$ mA

K.1 (gelb) = Schaltknoten, K.2 (blau) = V_{OUT} K.M (rot) = Δv_{L1} , K.4 (grün) = I_{L1}

Der Punkt, an dem der Spulenstrom am Ende jedes Schaltzyklus genau null erreicht, wird häufig als BCM (Boundary Conduction Mode) bezeichnet. Er lässt sich mathematisch wie folgt definieren:

Buck und potentialfreier Buck

$$L_{BCM-B} = \frac{V_O}{V_{IN}} \cdot \frac{V_{IN} - V_O}{2 \cdot f_{SW} \cdot I_{O-MAX}} \quad (12)$$

$$L_{BCM-B} = \frac{12 \text{ V}}{360 \text{ V}} \cdot \frac{360 \text{ V} - 12 \text{ V}}{2 \cdot 60 \text{ kHz} \cdot 0,2 \text{ A}}$$

$$L_{BCM-B} = 483 \mu\text{H}$$

Buckboost Wandler

$$L_{BCM-BB} = \frac{V_{IN}}{V_O - V_{IN}} \cdot \frac{|-V_O|}{2 \cdot f_{SW} \cdot I_{O-MAX}} \quad (13)$$

$$L_{BCM-BB} = \frac{360 \text{ V}}{12 \text{ V} - 360 \text{ V}} \cdot \frac{12 \text{ V}}{2 \cdot 60 \text{ kHz} \cdot 0,2 \text{ A}}$$

$$L_{BCM-BB} = 517 \mu\text{H}$$

APPLICATION NOTE



Sicheres, zuverlässiges Design Nichtisolierter Offline-Wandler mit 400 V_{DC} Hochvolt Speicherdrosseln

Diese Gleichungen zeigen die Induktivitätswerte, oberhalb derer die Wandler im CCM betrieben würden, wenn sie ihren maximalen Nennstrom unter Last liefern. Bei nichtsynchrone Wandler wird dabei immer ein Schwellenwert beim Ausgangsstrom vorhanden sein, bei dessen Unterschreiten der Wandler unabhängig von der Größe der Induktivität vom CCM in den DCM wechselt. Am DCM ist dabei nichts Schlimmes, sondern ein Betrieb in diesem Modus im Volllastbereich ist bei nichtisolierten HV-Anwendungen sogar häufiger anzutreffen. Wurde bei CCM-Wandlern die tatsächliche Induktivität ausgewählt, dann können die Gleichungen GL. 12 und GL. 13 so umgeschrieben werden, dass sie den BCM-Grenzwert als Funktion des Laststroms darstellen. Bei einer exemplarisch gewählten 2,2-mH-Drossel würden sie dann wie folgt lauten:

Buck und potentialfreier Buck

$$I_{O_{BCM-B}} = \frac{V_O}{V_{IN}} \cdot \frac{V_{IN} - V_O}{2 \cdot f_{SW} \cdot L_1} \quad (14)$$

$$I_{O_{BCM-B}} = \frac{12 \text{ V}}{360 \text{ V}} \cdot \frac{360 \text{ V} - 12 \text{ V}}{2 \cdot 60 \text{ kHz} \cdot 2,2 \text{ mH}}$$

$$I_{O_{BCM-B}} = 44 \text{ mA}$$

Buckboost Wandler

$$I_{O_{BCM-BB}} = \frac{V_{IN}}{V_O - V_{IN}} \cdot \frac{-V_O}{2 \cdot f_{SW} \cdot L_1} \quad (15)$$

$$I_{O_{BCM-BB}} = \frac{360 \text{ V}}{12 \text{ V} - 360 \text{ V}} \cdot \frac{-12 \text{ V}}{2 \cdot 60 \text{ kHz} \cdot 2,2 \text{ mH}}$$

$$I_{O_{BCM-BB}} = 47 \text{ mA}$$

6. Konstruktionsbeispiel für den DCM-Modus

Im DCM fällt der Strom in der Speicherdrossel zum Ende jedes Schaltzyklus hin auf null ab. Um im DCM betrieben werden zu können, muss der Schaltwandler deswegen entweder eine Diode als ungesteuerten Schalter verwenden oder den synchronen MOSFET aktiv steuern, um einen Stromfluss in Gegenrichtung (also von Drain zu Source) zu vermeiden. Aus Kostengründen wird in solchen Szenarios in aller Regel eine Diode eingesetzt, während beim Betrieb mit Spannungen über 200 V_{DC} ein ultraschneller PN-Gleichrichter die bevorzugte Technologie.

Der wesentliche Vorteil des DCM besteht darin, dass die Induktivität niedriger sein muss, um zu gewährleisten, dass der Wandler auch bei höchster Last im DCM verbleibt. Eine niedrigere Induktivität erfordert einen kleineren Kern und gestattet folglich kleinere und somit preiswertere Drosseln. Ein zweiter Vorteil des DCM sind die niedrigeren Schaltverluste im Steuer-FET, da der Strom in der Drossel beim Einschalten immer null ist.

Nachfolgend sind Konstruktionsbeispiele für einen Buck-Wandler, einen potenzialfreien Buck-Wandler und einen Buckboost-Wandler im DCM beschrieben. Die Betriebsbedingungen entsprechen dabei denen des CCM-Beispiels aus dem vorherigen Abschnitt.

6.1. Auswahl der Speicherdrossel

Dieselben Gleichungen, mit denen wir die Grenze zwischen DCM- und CCM-Betrieb ermittelt haben, werden nun zur Auswahl der Induktivität für den DCM verwendet; der einzige Unterschied besteht darin, dass hiermit nun eine maximal zulässige Induktivität festgelegt wird. Hier also noch einmal die Gleichungen GL. 14 und GL. 15:

Buck und potentialfreier Buck

$$L_{MAX-B} = \frac{12 \text{ V}}{360 \text{ V}} \cdot \frac{360 \text{ V} - 12 \text{ V}}{2 \cdot 60 \text{ kHz} \cdot 0,2 \text{ A}} = 483 \text{ } \mu\text{H}$$

Buckboost Wandler

$$L_{MAX-B} = \frac{360 \text{ V}}{12 \text{ V} - 360 \text{ V}} \cdot \frac{-12 \text{ V}}{2 \cdot 60 \text{ kHz} \cdot 0,2 \text{ A}} = 517 \text{ } \mu\text{H}$$

APPLICATION NOTE



Sicheres, zuverlässiges Design Nichtisolierter Offline-Wandler mit 400 V_{DC} Hochvolt Speicherdrosseln

In der Theorie müsste jeder Wert unterhalb von L_{MAX} funktionieren; weil aber Induktivität und Spitzenstrom umgekehrt proportional zueinander sind, ist es in der Praxis am besten, den nächstniedrigeren Standardwert auszuwählen, um zu verhindern, dass der Spitzenstrom übermäßig hohe Werte einnimmt. Ein E12-Standardwert von 470 µH funktioniert in beiden Konstruktionen einwandfrei. Um nun das passende Bauelement aus einem Katalog auswählen zu können, müssen wir die Spitzenströme für die jeweilige Topologie berechnen. Spitzen- und Peak-to-Peak-Rippelstrom sind im DCM gleich, und zur Berechnung dieses Wertes muss zunächst der Tastgrad ermittelt werden. Wenn der tatsächliche Spulenwert ausgewählt ist, ist auch die bei jedem Schaltzyklus die vom Eingang zum Ausgang übertragene Energiemenge bekannt, und der Tastgrad des Steuer-FET kann für jede Topologie berechnet werden:

Buck und potentialfreier Buck	Buckboost Wandler
$D_{DCM-B} = \frac{V_O}{V_{IN}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot f_{SW} \cdot L_1}{R_O \cdot \left(1 - \frac{V_O}{V_{IN}}\right)}} \quad (16)$	$D_{DCM-BB} = \frac{V_O}{V_{IN}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot f_{SW} \cdot L_1}{R_O}} \quad (17)$

$$D_{DCM-B} = \frac{V_O}{V_{IN}} \times \sqrt{\frac{2 \times f_{SW} \times L_1}{R_O \cdot \left(1 - \frac{V_O}{V_{IN}}\right)}} \quad \text{GL. 16}$$

$$D_{DCM-BB} = \frac{V_O}{V_{IN}} \times \sqrt{\frac{2 \times f_{SW} \times L_1}{R_O}} \quad \text{GL. 17}$$

(Lastwiderstand $R_O = (V_O \div I_{O-MAX}) = 12 \text{ V} \div 0,2 \text{ A} = 60 \Omega$ für beide Topologien)

$$D_{DCM-B} = \frac{12V}{360V} \times \sqrt{\frac{2 \times 60kHz \times 470\mu H}{60\Omega \cdot \left(1 - \frac{12}{360}\right)}} = 0,033$$

$$D_{DCM-BB} = \frac{12V}{360V} \times \sqrt{\frac{2 \times 60kHz \times 470\mu H}{60\Omega}} = 0,032$$

Der nächste Schritt besteht in der Berechnung der Spitzenspulenströme:

$$I_{L-PK-B} = \frac{(V_{IN} - V_O) \times D_{DCM-B}}{f_{SW} \times L_1} \quad \text{GL. 18}$$

$$I_{L-PK-BB} = \frac{V_{IN} \times D_{DCM-BB}}{f_{SW} \times L_1} \quad \text{GL. 19}$$

$$I_{L-PK-B} = \frac{(360V - 12V) \times 0,033}{60kHz \times 470\mu H} = 0,41A$$

$$I_{L-PK-BB} = \frac{360V \times 0,032}{60kHz \times 470\mu H} = 0,41A$$

Basierend auf den Grenzwerten für Induktivität und Spitzenstrom lässt sich nun eine passende Drossel auswählen. Die 7687714471 aus der WE-PD HV-Produktreihe ist eine 470 µH-Drossel mit einem Sättigungsstromgrenzwert von 0,8 A. Es handelt sich hierbei um eine Komponente zur Oberflächenmontage mit magnetischer Schirmung für eine gute EMV und einer Grundfläche von 10 mm × 10 mm bei 6 mm Höhe. Der wichtigste Faktor aber besteht darin, dass bei der Baureihe 768771x dank Konstruktions- und Nachproduktionsprüfungen sichergestellt ist, dass die Bauteile bei Differenzspannungen bis 400 V_{DC} einwandfrei funktionieren. Ein solches Bauteil wäre eine gute Wahl für doppelseitige Leiterplatten, auf denen ein nichtisolierter Abwärtsregler gemeinsam mit anderen oberflächenmontierten Schaltungen verwendet wird. Für einfachere Anwendungen, bei denen die Leiterplatte nur eine Lage hat und bei den Kondensatoren, der

APPLICATION NOTE



Sicheres, zuverlässiges Design Nichtisolierter Offline-Wandler mit 400 V_{DC} Hochvolt Speicherdrosseln

Diode, dem MOSFET und den Widerständen preisgünstigere Durchsteckkomponenten verwendet werden, wäre die 768772471 aus der WE-TI HV-Baureihe eine bessere Wahl: Ein Durchsteckbauteil, ebenfalls mit 470 μ H und einem Sättigungsnennstrom von 0,9 A.

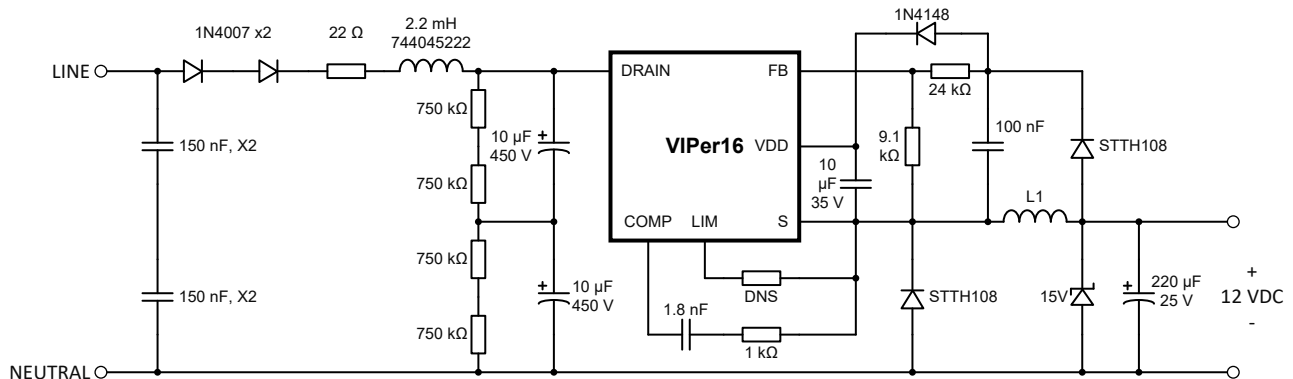
APPLICATION NOTE



Sicheres, zuverlässiges Design Nichtisolierter Offline-Wandler mit 400 V_{DC} Hochvolt Speicherdrosseln

7. Anhang

7.1. Vollständiges Schaltbild für Buck-Wandler



7.2. Würth Elektronik eiSos-HV-Speicherdrosseln

Für Speicherdrosseln der folgenden Baureihen garantiert Würth Elektronik eiSos gemäß internem Standard 1516 auch nach drei Reflow-Prozessen einen ordnungsgemäßen Betrieb bis 400 V_{DC}.



Abbildung 7a
[WE-PD HV](#)



Abbildung 7b
[WE-PD2 HV](#)



Abbildung 7c
[WE-TI HV](#)

Abmessungen: 7,3 mm × 4,5 mm
10 mm × 6 mm
12 mm × 10 mm

7,8 mm × 5 mm
10 mm × 5,4 mm

8,0 mm × 9,5 mm

L: 0,22 ~ 3,3 mH

0,56 ~ 2,2 mH

0,22 ~ 2,2 mH

I_R: 0,26 ~ 1,3 A

0,15 ~ 0,41 A

0,32 ~ 0,9 A

I_{SAT}: 0,25 ~ 2,0 A

0,2 ~ 0,38 A

0,32 ~ 1,3 A

R_{DC}: 0,3 ~ 5,5 Ω

1,7 ~ 6,0 Ω

0,5 ~ 3,9 Ω

APPLICATION NOTE



Sicheres, zuverlässiges Design Nichtisolierter Offline-Wandler mit 400 V_{DC} Hochvolt Speicherdrosseln

WICHTIGER HINWEIS

Der Anwendungshinweis basiert auf unserem aktuellen Wissens- und Erfahrungsstand, dient als allgemeine Information und ist keine Zusicherung der Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG zur Eignung des Produktes für Kundenanwendungen. Der Anwendungshinweis kann ohne Bekanntgabe verändert werden. Dieses Dokument und Teile hiervon dürfen nicht ohne schriftliche Genehmigung vervielfältigt oder kopiert werden. Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG und seine Partner- und Tochtergesellschaften (nachfolgend gemeinsam als „WE“ genannt) sind für eine anwendungsbezogene Unterstützung jeglicher Art nicht haftbar. Kunden sind berechtigt, die Unterstützung und Produktempfehlungen von WE für eigene Anwendungen und Entwürfe zu nutzen. Die Verantwortung für die Anwendbarkeit und die Verwendung von WE-Produkten in einem bestimmten Entwurf trägt in jedem Fall ausschließlich der Kunde. Aufgrund dieser Tatsache ist es Aufgabe des Kunden, erforderlichenfalls Untersuchungen anzustellen und zu entscheiden, ob das Gerät mit den in der Produktspezifikation beschriebenen spezifischen Produktmerkmalen für die jeweilige Kundenanwendung zulässig und geeignet ist oder nicht.

Die technischen Daten sind im aktuellen Datenblatt zum Produkt angegeben. Aus diesem Grund muss der Kunde die Datenblätter verwenden und wird ausdrücklich auf die Tatsache hingewiesen, dass er dafür Sorge zu tragen hat, die Datenblätter auf Aktualität zu prüfen. Die aktuellen Datenblätter können von www.we-online.com heruntergeladen werden. Der Kunde muss produktspezifische Anmerkungen und Warnhinweise strikt beachten. WE behält sich das Recht vor, an seinen Produkten und Dienstleistungen Korrekturen, Modifikationen, Erweiterungen, Verbesserungen und sonstige Änderungen vorzunehmen.

Lizenzen oder sonstige Rechte, gleich welcher Art, insbesondere an Patenten, Gebrauchsmustern, Marken, Urheber- oder sonstigen gewerblichen Schutzrechten werden hierdurch weder eingeräumt noch ergibt sich hieraus eine entsprechende Pflicht, derartige Rechte einzuräumen. Durch Veröffentlichung von Informationen zu Produkten oder Dienstleistungen Dritter gewährt WE weder eine Lizenz zur Verwendung solcher Produkte oder Dienstleistungen noch eine Garantie oder Billigung derselben.

Die Verwendung von WE-Produkten in sicherheitskritischen oder solchen Anwendungen, bei denen aufgrund eines Produktausfalls sich schwere Personenschäden oder Todesfällen ergeben können, sind unzulässig. Des Weiteren sind WE-Produkte für den Einsatz in Bereichen wie Militärtechnik, Luft- und Raumfahrt, Nuklearsteuerung, Marine, Verkehrswesen (Steuerung von Kfz, Zügen oder Schiffen), Verkehrssignalanlagen, Katastrophenschutz, Medizintechnik, öffentlichen Informationsnetzwerken usw. weder ausgelegt noch vorgesehen. Der Kunde muss WE über die Absicht eines solchen Einsatzes vor Beginn der Planungsphase (Design-In-Phase) informieren. Bei Kundenanwendungen, die ein Höchstmaß an Sicherheit erfordern und die bei Fehlfunktionen oder Ausfall eines elektronischen Bauteils Leib und Leben gefährden können, muss der Kunde sicherstellen, dass er über das erforderliche Fachwissen zu sicherheitstechnischen und rechtlichen Auswirkungen seiner Anwendungen verfügt. Der Kunde bestätigt und erklärt sich damit einverstanden, dass er ungeachtet aller anwendungsbezogenen Informationen und Unterstützung, die ihm durch WE gewährt wird, die Gesamtverantwortung für alle rechtlichen, gesetzlichen und sicherheitsbezogenen Anforderungen im Zusammenhang mit seinen Produkten und der Verwendung von WE-Produkten in solchen sicherheitskritischen Anwendungen trägt. Der Kunde hält WE schad- und klaglos bei allen Schadensansprüchen, die durch derartige sicherheitskritische Kundenanwendungen entstanden sind.

NÜTZLICHE LINKS

Application Notes:

<http://www.we-online.de/app-notes>

Component Selector:

<http://www.we-online.de/component-selector>

Toolbox:

<http://www.we-online.de/toolbox>

Produkt Katalog:

<http://katalog.we-online.de/>

KONTAKTINFORMATIONEN

Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG

Max-Eyth-Str. 1, 74638 Waldenburg, Germany

Tel.: +49 (0) 7942 / 945 – 0

Email: appnotes@we-online.de

Web: <http://www.we-online.de>