

Störungen in Schaltnetzteilen effektiv beseitigen **Netzfilter im SO-8?**

Im Vergleich zur Digitalelektronik erfolgt die Miniaturisierung von Netzfiltern für Schaltnetzteile oder Umrichter äußerst langsam. Auch heute noch sind hierfür abhängig von der übertragenen Leistung stets recht schwergewichtige, große und teure Bauteile im Einsatz. Diese Netzfilter durch ein winziges Bauteil ersetzen zu wollen, erscheint zunächst absurd, denn Spannungsfestigkeit und Strombelastung setzen doch scheinbar unüberwindbare Grenzen für eine weitere Reduzierung der Baugröße. Dieser Beitrag beschreibt, wie auf elektronischem Wege die Störungen in einem Schaltnetzteil deutlich reduziert werden können, so dass Aufwand, Baugröße und Kosten für Filterstufen signifikant gesenkt werden können.

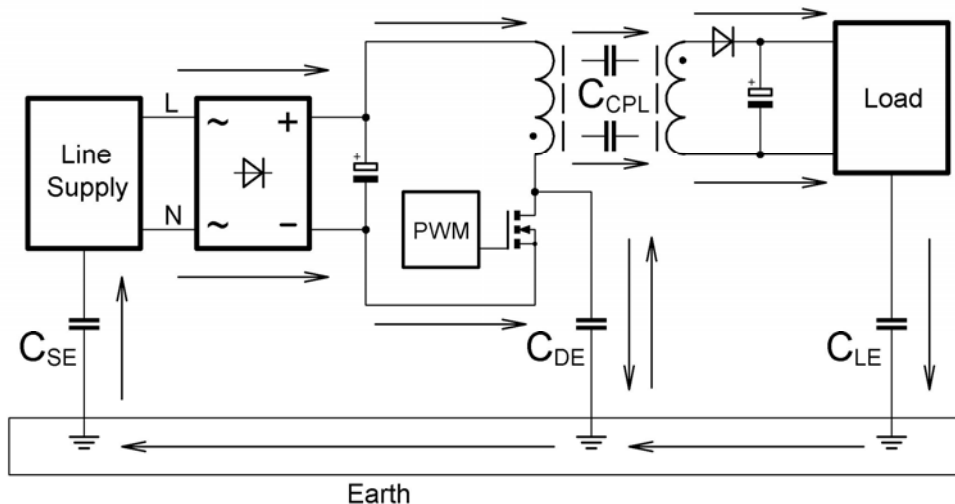


Bild 1: Prinzipschaltbild eines unentstörten Schaltnetzteiles

Bild 1 zeigt ein prinzipielles Modell der Ausbreitung von Störungen in einem Schaltnetzteil. Stärkste aber nicht einzige Quelle von hochfrequenten Störungen ist meist der Schalttransistor. Er schaltet hohe Ströme und Spannungen mit steilen Flanken, um so die Umschaltverluste in Grenzen zu halten.

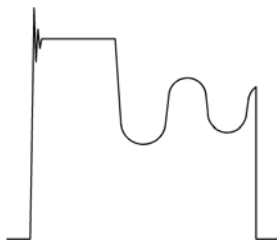


Bild 2: Drainspannung eines Sperrwandlers

Wie sich leicht am typischen Verlauf der Drainspannung (Bild 2) eines Sperrwandlers sehen lässt, enthält diese Kurvenform ein breites Spektrum unterschiedlicher Frequenzanteile. Betrachten wir also hier vereinfacht den Drainanschluss des Schalttransistors als die Quelle der Störungen. Dabei treten in einem leistungsfähigen Sperrwandler mit heutiger Technologie am Transistor Spannungen von deutlich über 500V und Spitzenströme von einigen Ampere auf. Bei üblichen Schaltfrequenzen um 100kHz und darüber kann also der Drainanschluss als breitbandiger Störgenerator hoher Leistung aufgefasst werden.

In diesem Beitrag soll nur auf die leitungsgebundenen Störungen im Frequenzbereich bis 30MHz eingegangen werden und nicht auf die hochfrequent abgestrahlten Anteile.

Wenn es eine Spannungsquelle gibt und sich zwischen ihren Potenzialen ein leitfähiges Medium befindet, so beginnt ein Strom zu fließen. In unserem Fall (Bild 1) fließt der breitbandige, hochfrequente Wechselstrom zunächst über die Koppelkapazität C_{CPL} des Transformators. Da der Ausgangskondensator des Sperrwandlers hochfrequenzmäßig einen Kurzschluss darstellt, ist die Störspannung am positiven und negativen Pol der Ausgangsspannung in Phase – man spricht von Gleichtaktstörungen. Ähnlich wirkt der Eingangselko nach dem Gleichrichter. Jede Last hat fast immer eine direkte oder indirekte (kapazitive) Verbindung zur Erde. So fließt der Ausgleichsstrom also über die Kapazität zwischen Last und Erde C_{LE} und die Kapazität zwischen Drain und Erde C_{DE} zurück zur Quelle. Gleichzeitig fließt auch ein weiterer Strom über C_{DE} und das über C_{SE} geerdete Netz zum Eingang des Netzteiles und von dort wieder zur Störquelle zurück. Hier sollen nur diese beiden wesentlichen Schleifen für Ausgleichsströme betrachtet werden.

Aus verschiedenen Gründen müssen nun die Störungen die über den Netzeingang oder auch die Last zur Erde abfließen, begrenzt werden. Einschlägige Richtlinien und Standards im Rahmen der EMV-Gesetzgebung vereinheitlichen die Grenzen für die (hier leitungsgebundene) Störaussendung von elektronischen Geräten.

Maßnahmen zur Reduzierung der Störaussendung

Bild 3 zeigt das Prinzip eines konventionell entstörten Netzgerätes. Im Wesentlichen sind hier zwei verschiedene Maßnahmen angewendet worden:

1. Die Einführung eines Y-Kondensators C_Y zwischen Primär- und Sekundärseite
2. Ein Filter für symmetrische Störungen im Netzeingang

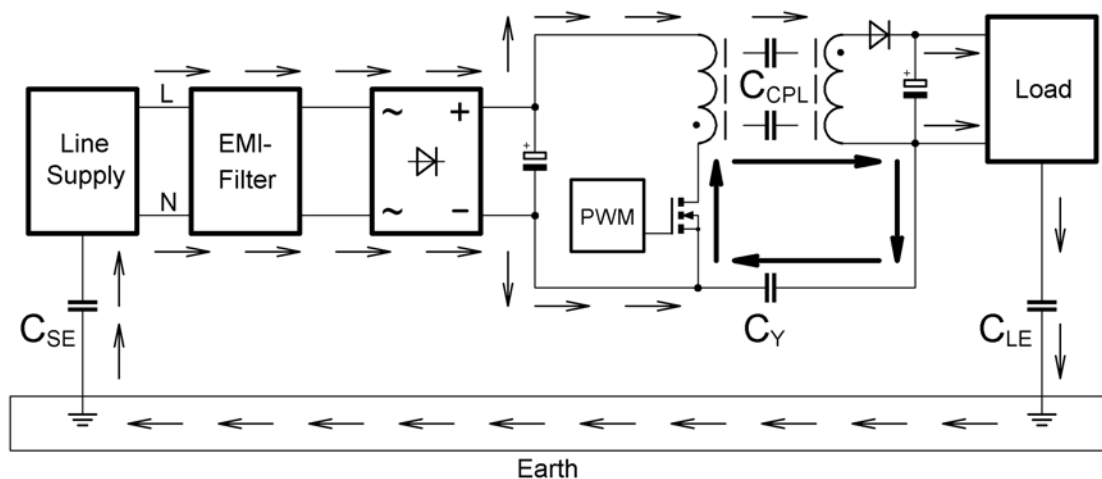


Bild 3: Prinzipschaltbild eines entstörten Netzgerätes

Bleiben wir bei unserem Modell und betrachten die Spannung zwischen Drain und Source des Transistors als Störquelle. Wie die nun dicken Pfeile verdeutlichen, fließt hier ein deutlich größerer Ausgleichsstrom über die Wicklungskapazität des Transformators und den eingeführten Y-Kondensator C_Y zurück zum Transistor. Durch diesen neuen Pfad, der den vorher genannten Pfaden parallel liegt, reduzieren sich die anderen Ausgleichströme entsprechend (dünne, kurze Pfeile).

Nun sind aber durch bestehende Normen insbesondere die Störungen, die das Netzteil in Richtung Netzeingang aussendet, besonders limitiert, um andere am gleichen Netz betriebenen Geräte nicht zu beeinträchtigen sowie um die Netzleitung nicht zur Antenne für die Störfrequenzen werden zu lassen. Rundfunkempfang wäre so kaum mehr möglich.

Aus diesem Grunde wird die Maßnahme 2 (Common Mode Netzfilter) angewendet. Dieses Netzfilter besteht im einfachsten Fall aus einem Tiefpass einer stromkompensierten Drossel mit einem Entstörkondensator. Aufgrund ihres Wicklungssinns besitzt die Drossel für Gleichtaktstörungen eine sehr hohe Impedanz, während sie für den Eingangsstrom (Gegentakt- oder Differential Mode) kaum einen nennenswerten Widerstand darstellt. Durch die hohe Impedanz der Drossel für Gleichtaktstörungen wird die Impedanz zwischen der Störquelle (Netzteil) und Störsenke (Netz) sehr hoch, was die Höhe der Ausgleichsströme auf das erlaubte Maß reduziert.

Grenzen konventioneller Entstörmaßnahmen

Somit hat sich die stromkompensierte Funkentstördrossel zusammen mit einem Filterkondensator zur universellen Lösung für die Entstörung des Netzeingangs von getakteten Wandlern entwickelt. Bei erhöhten Anforderungen an die Entstörung sind sehr oft mehrstufige Netzfilter notwendig. Der Weltmarkt für diese Komponenten liegt bei einigen Milliarden Euro.

Verschiedene Faktoren limitieren jedoch den Einsatz dieser beiden im vorigen Abschnitt genannten Maßnahmen:

1. Störungen können sehr vielfältige Ursachen haben. So gibt es Systeme mit mehreren Schaltern an verschiedenen Orten. Außerdem muss man bedenken, dass auch Dioden die vom leitenden in den gesperrten Zustand wechseln hochfrequente Störer ersten Grades sein können.
2. Sämtliche Bauteile bestehen neben ihren genutzten Eigenschaften auch aus zahlreichen parasitären Elementen. Hier seien nur als Beispiel die Wicklungskapazität von induktiven Bauteilen, ESR und ESL von Kondensatoren, Streuinduktivitäten von Transformatoren sowie Ausgangskapazitäten von Halbleiterschaltern erwähnt. Diese auf den ersten Blick sehr häufig unterschätzten Eigenschaften bilden viele kleine Resonanzkreise von oft sehr hoher Güte, die die Entstörung einer Schaltung manchmal zur Nervenprobe werden lässt.
3. Für unterschiedliche Geräteklassen gelten unterschiedliche Grenzwerte. So reicht häufig eine Filterstufe im Netzeingang nicht aus und manchmal wird es sogar mit zwei Filterstufen noch sehr schwierig. Hier helfen oft weitere Maßnahmen wie die Entstörung direkt am Bauteil (Snubber), was aber oft mit zusätzlichen Verlusten bezahlt werden muss.
4. Der Ableitstrom für die Netzfrequenz von der Primärseite zur (meist berührbaren) Sekundärseite ist aus Sicherheitsgründen limitiert. Ganz besonders für medizinische Geräte gelten stark verschärfte Vorschriften, die eine normgerechte Entstörung deutlich erschweren. Dieser Ableitstrom wird im Wesentlichen von der Größe des Y-Kondensators bestimmt, der mit zunehmender Kapazität auch den Ableitstrom erhöht.
5. Im Interesse eines hohen Wirkungsgrades und einer befriedigenden Funktion des Netzgerätes ist eine sehr gute Kopplung des Transformators gefordert. Die damit zunehmende Kopplungskapazität C_{CPL} liegt dem Y-Kondensator parallel und reduziert den maximal möglichen Wert für dieses Bauteil nochmals. Außerdem steigt durch die bessere Kopplung des Transformators der Störstrom, der seinen Weg zurück zur Quelle finden muss.

Ein Weg aus der Misere

Wie bereits erwähnt limitiert der jeweils zugelassene Ableitstrom zwischen Primär- und Sekundärseite die maximale Größe des Y-Kondensators. Dies tut häufig weh, denn der kurze Schluss der Ausgleichsströme in der Nähe der Quelle gehört zu den preiswertesten und wirksamsten Maßnahmen bei der Entstörung. Sehr oft wäre ein EMV-Problem durch den Einsatz einer größeren Y-Kapazität einfach lösbar.

Was also tun? Wenn der Berg nicht zum Propheten kommt, so muss sich dieser eben auf den Weg machen. Zum Glück haben wir es beim limitierten Ableitstrom mit der Netzfrequenz und ein paar Harmonischen davon (i.d.R. bis 800Hz) zu tun. Der Frequenzbereich, in dem die leitungsgebundenen Störungen bewertet werden, beginnt bei 150kHz, also grob dem 1000-fachen und endet bei 30MHz. Wenn es nun gelänge, den hochfrequenten Strom durch einen Y-Kondensator z.B. um den Faktor 10 zu erhöhen, so könnte dessen Wert bei gleicher Wirkung 10 mal kleiner werden – oder sich seine Wirkung um diesen Faktor vergrößern.

Der Y-Cap Booster

Wenn man sich erinnert, wie ein invertierender Verstärker funktioniert (Bild 4), so erkennt man, dass die verstärkte Ausgangsspannung gegenphasig zur Eingangsspannung ist. Auch für Wechselspannungen gilt in den Grenzen der linearen Übertragungsfunktion die Beziehung:



Bild 4: Invertierender Verstärker

Üblicherweise wird ein Y-Kondensator zwischen Primärmasse und Sekundärmasse geschaltet. Es gibt Ausnahmen, die am Aufbau des Gerätes liegen und eine Optimierung der Entstörmwirkung liefern. Fließt nun ein Störstrom über diesen Y-Kondensator so entsteht über seiner Impedanz ein entsprechender Spannungsabfall (V_{NOISE}).

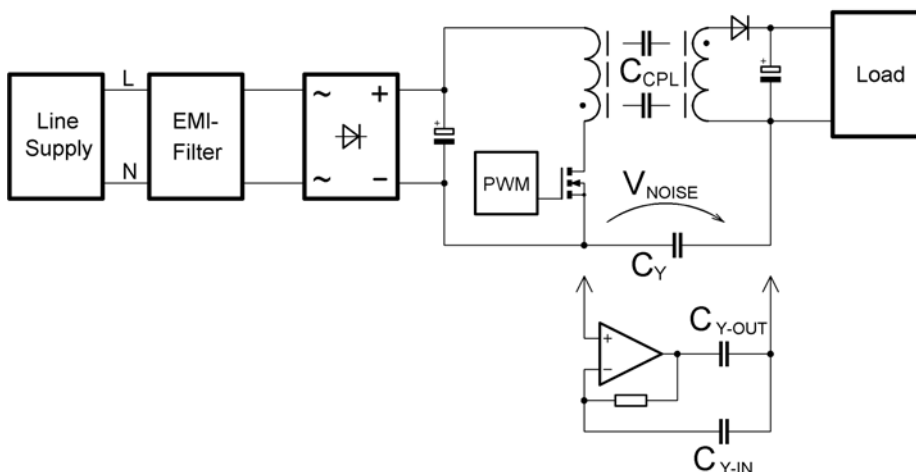


Bild 5: Ersatz des Y-Kondensators durch eine Boosterschaltung

Bild 5 zeigt wieder den invertierenden Verstärker, diesmal jedoch mit AC-Kopplung. Die Eingangsimpedanz Z_{IN} ist durch C_{Y-IN} ersetzt worden. Da dieser nun auf der Sekundärmasse liegt, ist die Eingangsspannung des Verstärkers nun die Spannungsdifferenz über dem (nunmehr gedachten, traditionellen) Y-Kondensator C_Y . Im Rahmen der Aussteuerbarkeit und des Frequenz-/Phasengangs des Verstärkers wird nun ein Strom durch C_{Y-OUT} getrieben, bis die Differenzspannung an den Eingängen des Operationsverstärkers gegen Null geht. Da die Ausgangsamplitude des OP viel größer ist als die Spannung V_{NOISE} , die über einem traditionellen Y-Kondensator abfällt, kann die Kapazität dieses Kondensators (C_{Y-OUT}) im selben Verhältnis verringert werden. Alternativ kann bei gleich großer Kapazität eine höhere Entstörwirkung genutzt werden.

Ein Spezial-IC für diese Aufgabe

Nun kann man für diese Aufgabe in der Praxis nicht einfach einen beliebigen schnellen Operationsverstärker hernehmen und implementieren. Insbesondere die Treiberfähigkeit kapazitiver Lasten, die abgestimmte Verstärkungsbandbreite, der interne Schutz gegen Überspannungen (Burst- und Surgetests!) sowie integrierte Hilfsfunktionen wie Temperaturschutz, interne Referenzspannung machen das Design eines Spezialbauteiles für diese Aufgabe sinnvoll.

PowerELab Limited entwickelte an der Universität Hong Kong diese Technologie und ein IC mit dem Namen WT6001. Es wird von *W2 Technology Inc.* produziert. Dieser Schaltkreis ist im SO-8 Gehäuse verfügbar und wird in Europa von der Firma *Finepower GmbH* in Ismaning bei München vertrieben.

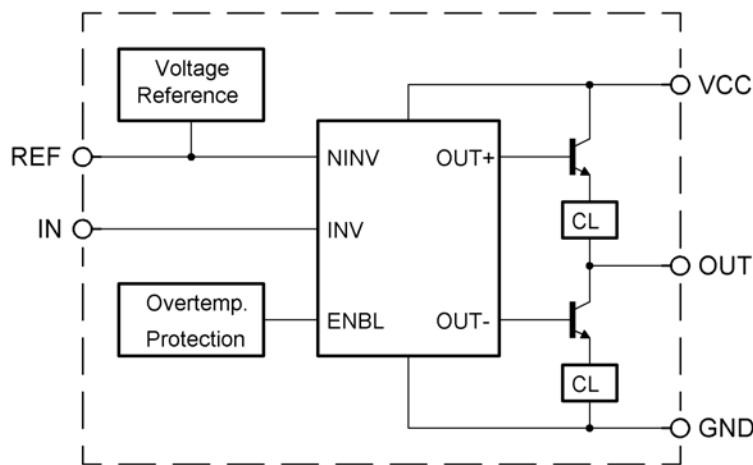


Bild 6: Blockschaltbild des Schaltkreises WT6001 von *W2 Technology Inc.*

Der praktische Einsatz des WT6001 ist relativ einfach. Eine verfügbare Demonstrationsschaltung mit nur 3 Anschlüssen verdeutlicht, dass zum Testen dieses Bausteins lediglich eine Betriebsspannung von 12V erforderlich ist, die sehr einfach von der Versorgung des primären PWM-Bausteins abgeleitet werden kann.

Die beiden anderen Anschlüsse des Demoboard (GND-PRI und GND-SEC) werden einfach anstelle des alten Y-Kondensators $CY(OLD)$ geschaltet. Einzige Einschränkung dabei ist, dass dieser wegen der Betriebsspannung des Moduls Massebezug auf der Primärseite haben muss.

Bild 7 zeigt die Anschaltung der Demonstrationsschaltung an ein ganz gewöhnliches Sperrwandlernetzteil.

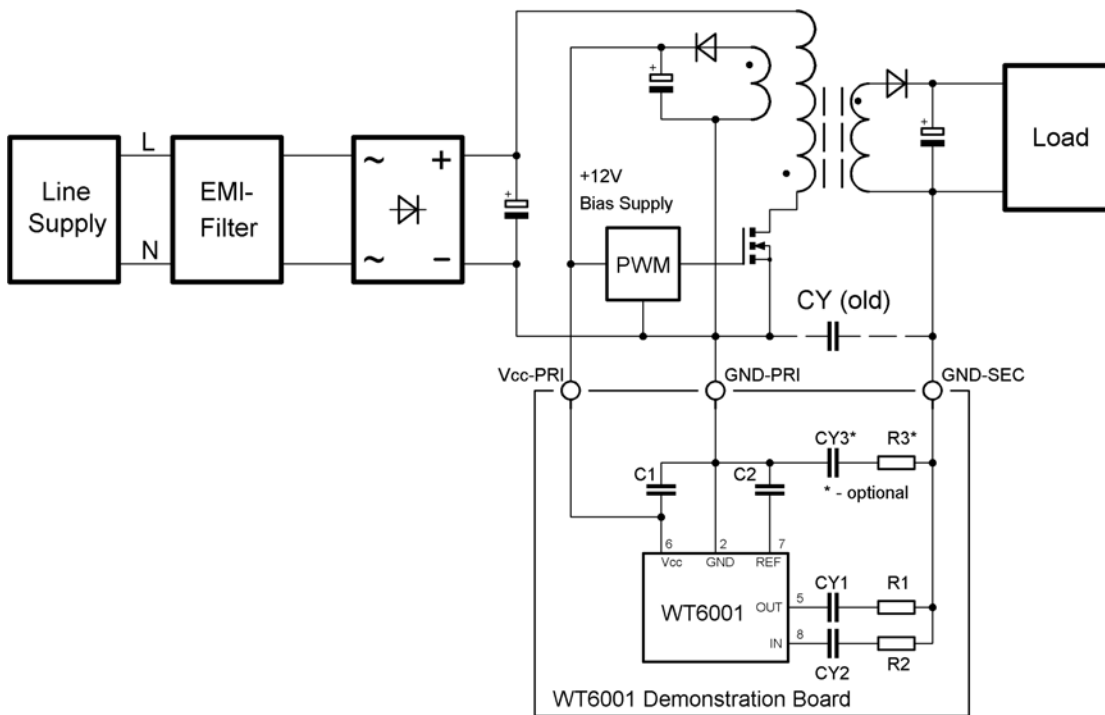


Bild 7: Um die Wirkungsweise des Bausteins zu testen, lässt sich die Demonstrationsschaltung mit nur 3 Anschlüssen sehr einfach anschließen.

Auf dem Demoboard werden nur wenige externe Bauteile benötigt. C1 (100nF) dient dem Abblocken der Betriebsspannung: Der Kondensator C2 (100nF) hat zwei Funktionen: zum einen dient er dem Abblocken der Referenzspannung und zum anderen der Einkopplung des HF-Bezugspotenzials (Primärmasse) auf den nichtinvertierenden Eingang des OP. R1 und R2 dienen der Einstellung von Bandbreite und zum Dämpfen von parasitären Schwingungen.

Anwendung der Demonstrationsschaltung

Zunächst wird über dem alten Y-Kondensator CY(OLD) – in unserem Beispiel 1nF – mit einem Oszilloskop die Störspannung zwischen Primär- und Sekundärseite gemessen (Bild 8a). Anschließend wird an dessen Stelle die aktive Schaltung wie in Bild 7 dargestellt eingesetzt. Durch die Verstärkung des Stromes durch den Y-Kondensator am Ausgang des ICs hat sich die Störspannung entsprechend verringert (Bild 8b).

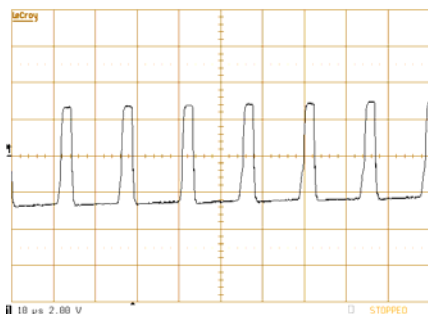


Bild 8a: Störspannung über CY(OLD) = 1nF

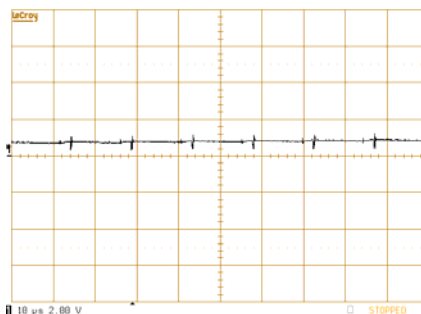


Bild 8b: Spannung über dem WT6001-Modul

Anders ausgedrückt: Das Modul zur Unterdrückung symmetrischer Störungen erzeugt im Rahmen seines Einsatzes einen virtuellen Kurzschluss (= sehr geringe Impedanz) für hochfrequente Ströme zwischen den Anschlüssen GND-PRI und GND-SEC. Damit wird auf elektronischem Wege ein Y-Kondensator mit sehr hoher Kapazität simuliert.

Der Rückkopplungswiderstand Z_{FB} aus Bild 4 ist in dem Baustein WT6001 bereits integriert und beträgt ca. $470k\Omega$. Er legt zusammen mit der Eingangsimpedanz ($CY2+R2$ aus Bild 7) die Verstärkung fest. Wichtig hierbei ist, dass die Verstärkung für die Netzfrequenz und ihre relevanten Oberwellen stets kleiner als 1 bleibt, damit nicht auch der Ableitstrom mitverstärkt wird.

Ersetzt man aus der Übertragungsfunktion des invertierenden Verstärkers (1) den Wert für Z_{IN} mit der Impedanz von $CY2$ aus Bild 7 (der Wert von $R2$ beträgt nur wenige Ohm und kann hier vernachlässigt werden), so ergibt sich eine Verstärkung des Systems von:

$$A = \frac{Z_{FB}}{Z_{IN}} = \frac{470k\Omega}{\frac{1}{2\pi f C_{Y2}}} = 2\pi f C_{Y2} \cdot 470k\Omega \quad (2)$$

Wählt man für $CY2$ einen Wert von $220pF$ so stellt sich bei der Nachrechnung heraus, dass für die 15. Harmonische der Netzfrequenz ($800Hz$) die Verstärkung deutlich kleiner als 1 ist. Für die niedrigste Frequenz im Spektrum für leitungsgebundene Störungen ($150kHz$) beträgt die rechnerische Verstärkung dagegen knapp 100 ($40dB$).

Da der invertierende Eingang und der Ausgang des Verstärkers herausgeführt sind, erlaubt ein externer Widerstand zwischen diesen beiden Anschlüssen eine Reduzierung der Verstärkung und damit eine Linearisierung des Frequenz-/Phasengangs. Somit besteht eine Möglichkeit, die Entstörfunktion an dieser Stelle auf den maximalen Effekt hin zu trimmen.

Praktische Ergebnisse

Wenn man die Wirkung des Y-Cap Boosters nicht nur im Zeitbereich (Bild 8) sondern auch im Frequenzbereich beurteilen will, so ist es sinnvoll, sich zunächst ein Bild davon zu machen, welche Wirkung der Y-Kondensator in einem konkreten Design hat. Das ist möglich, wenn man im Labor zunächst eine Messung der leitungsgebundenen Störungen am fertigen Gerät vornimmt und diese vergleicht mit einer Messung mit kurzgeschlossenem Y-Kondensator (Achtung: Sicherheitsaspekte beachten!). Sind die Störungen mit kurzgeschlossenem Y-Kondensator deutlich geringer geworden, dann lässt sich aus diesem Ergebnis direkt das Potenzial ableiten, das mit dem beschriebenen Verfahren möglich ist.

Um ein praktisches Beispiel zu zeigen wurde in einem Test ein handelsüblicher, nach EN55022 class B entstörter AC/DC-Adapter untersucht. Für den Test wurden nun sämtliche stromkompensierten Drosseln im Eingang und Ausgang des Netzteiles gebrückt. Bild 9 zeigt den gemessenen Störpegel, der durch diese Maßnahme breitbandig angehoben ist.

Im nächsten Schritt wurde der vorhandene Y-Kondensator zwischen der Primär- und Sekundärseite versuchsweise überbrückt. Das Ergebnis ist in Bild 10 zu sehen. Aus der Absenkung des Störpegels erkennt man, dass die Koppelkapazität des Transformators einen sehr großen Anteil an den vorhandenen Störungen besitzt, die durch die begrenzte Kapazität des Y-Kondensators (Ableitstrom!) nur unvollständig ausgeglichen werden können.

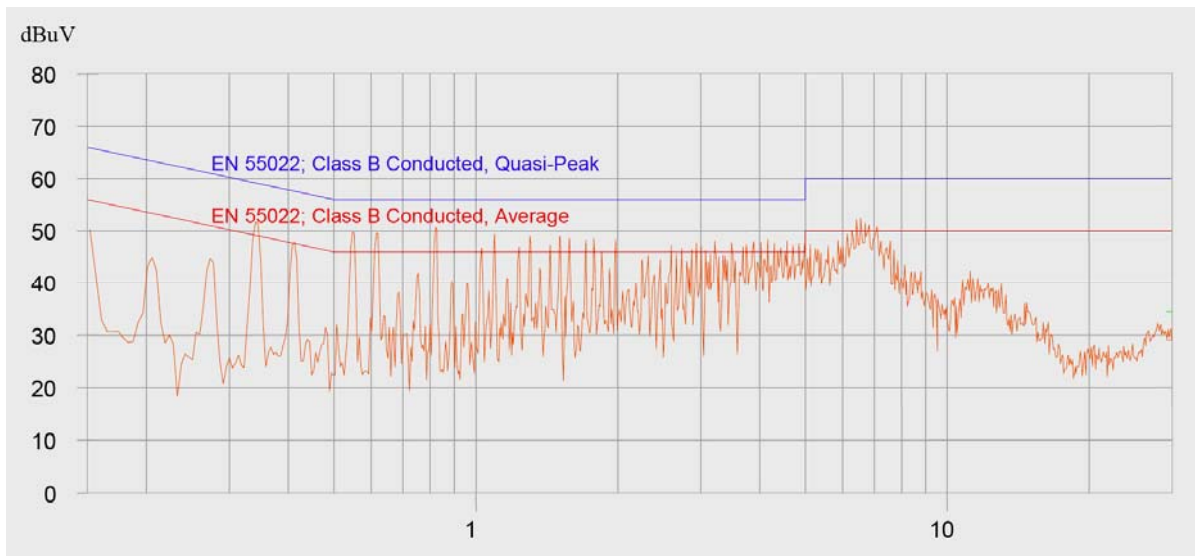


Bild 9: Leitungsgebundene EMI mit gebrückten Common Mode Drosseln

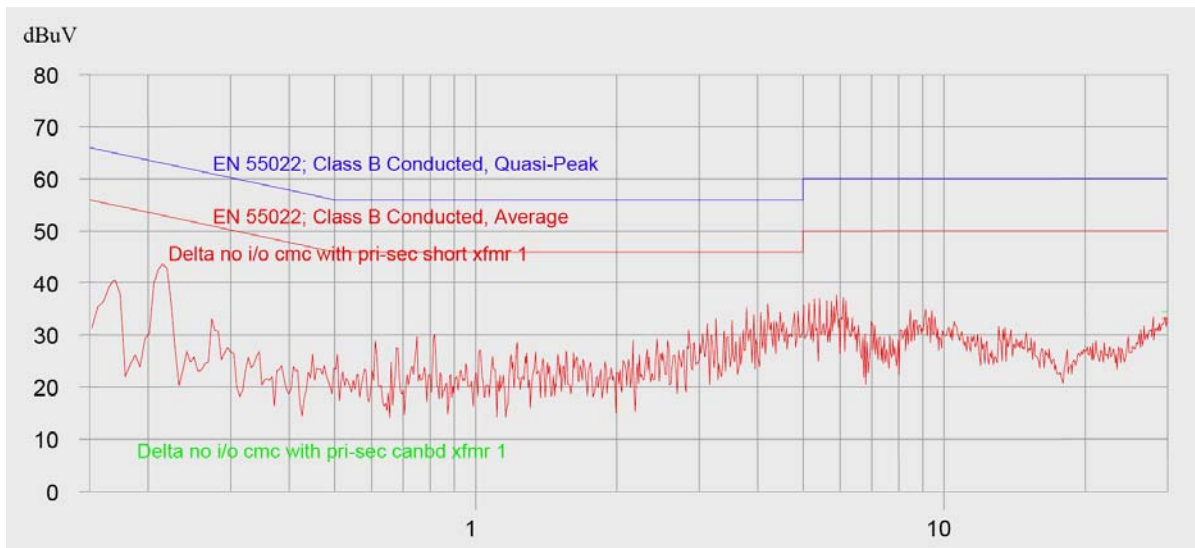


Bild 10: Ein Y-Kondensator mit „0Ω Impedanz“ könnte den Störpegel um ca. 20dB senken.

Interessant wird es, wenn man anstelle des kurzgeschlossenen Y-Kondensators nun den Y-Cap Booster einsetzt. Der Arbeitswiderstand des Verstärkers besteht aus einem Y-Kondensator mit 1nF Kapazität. Bezogen auf den Netz-Ableitstrom liegt diesem ein weiterer Y-Kondensator am Eingang des OP von 220pF parallel. Damit können die meisten Anforderungen bezüglich des Ableitstromes erfüllt werden.

Wie in Bild 11 zu sehen ist, wird der Störpegel mit kurzgeschlossenem Y-Kondensator (rot) mit dem erreichten Pegel durch den Y-Cap Booster (grün) verglichen. Im unteren Frequenzbereich sehen die Werte sehr ähnlich aus, während sich im höheren Frequenzbereich Frequenzgang, Phasendrehung und andere parasitäre Bauteileigenschaften bemerkbar machen. An dieser Stelle sei bemerkt, dass durch eine Anpassung der Verstärkung durch einen Widerstand zwischen Ein- und Ausgang des OP's die Wirkung in diesem Frequenzbereich optimiert werden kann.

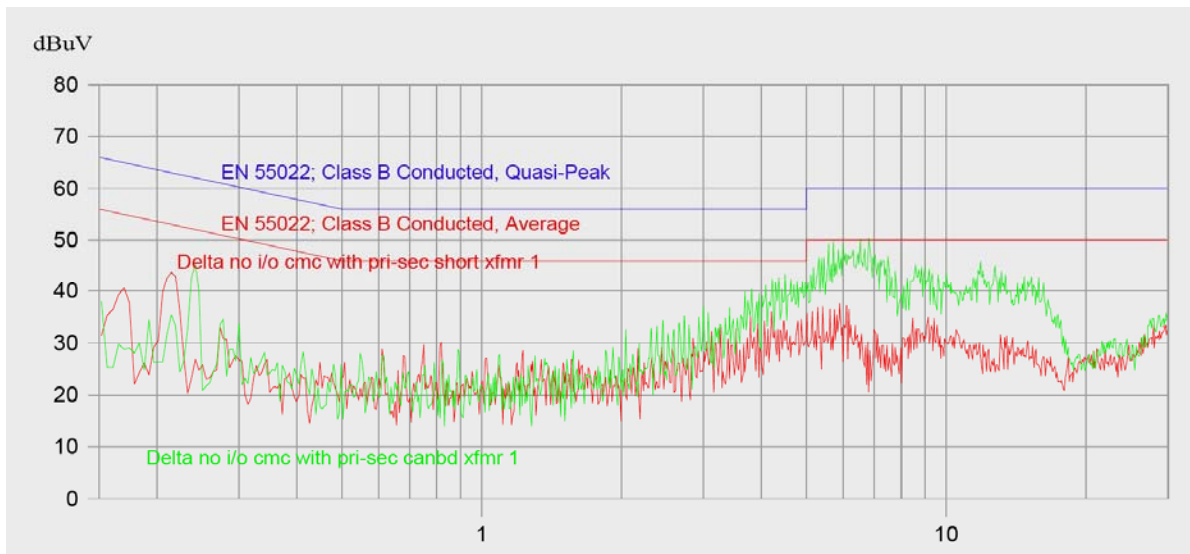


Bild 11: Direkter Vergleich des Y-Cap Boosters mit kurzgeschlossenem Y-Kondensator

Weiterhin kann die hier immer noch überbrückte stromkompensierte Entstördrossel im Netzeingang auf den höheren Frequenzbereich optimiert ausgelegt werden. Dies führt zu einer Verringerung der Induktivität für dieses Bauteil und bei gegebenem Strom somit zu einer Reduzierung der Baugröße und des Preises.

Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, dass ein Großteil der Gleichtaktstörungen in einem Schaltnetzteil durch die Koppelkapazität des Transformators verursacht werden und über einen Y-Kondensator zur Störquelle (Schalttransistor) zurückgeführt werden müssen. Aus Gründen des Berührungsschutzes (Netzableitstrom) ist die Kapazität dieses Kondensators begrenzt, was seine Wirkung einschränkt.

Mittels eines sogenannten Y-Cap Boosters wird die zwischen der Primär- und Sekundärseite vorhandene, hochfrequente Störspannung verstärkt und ein entsprechend erhöhter Ausgleichsstrom durch den Y-Kondensator getrieben. Dadurch lässt sich die Wirkung des Y-Kondensators deutlich erhöhen, der Ableitstrom senken sowie der Aufwand im Netzfilter (Baugröße, Preis) senken.

Referenzen

- [1] Datenblatt WT6001 (W2 Technology Inc.) 2007 Rev0.1 (www.finepower.com)
- [2] Application Note of Active EMI and Noise Cancellation Module (Powerelab Limited, Hongkong) 2005 Rev. 01 (www.finepower.com)