

APPLICATION NOTE

ANS022 | Brückenkondensator für isolierte Power Module, die ganze Wahrheit, keine Mythen



Timur Uludag

1. EINFÜHRUNG

Die Entscheidung, welche Art von Gleichtakt-EMV-Filter beim Design eines isolierten DC/DC-Wandlers oder eines Power-Moduls zur Bestehung der EMV-Prüfung gewählt wird, führt auch heutzutage noch häufig zu nicht optimalen Lösungen. Das Wissen um Gleichtaktstörungen und deren Minderung ist geprägt von Mythen. „Gleichtaktstörung ist ziemlich schwer zu verstehen“ wird als erstes Argument angeführt. Gefolgt von „Gleichtaktstörung ist eher ein Versuch-und-Irrtum-Prozess“. Zur Minimierung wird fast ausschließlich eine Gleichtaktdrossel als Mittel der Wahl angegeben. Diese Art der Betrachtung vernachlässigt aber, dass sich auch Gleichtaktstörungen mit Hilfe der grundlegenden elektrischen Wechselwirkungen bzw. parasitären Elemente und des kirchhoffschen Gesetzes erklären lassen. Die Schaffung der Grundlagen zum Verständnis der Entstehung und Ausbreitung von

Gleichtaktstörungen sowie ein Ansatz anhand einer Formel zur Auslegung eines simplen Filters für die Minimierung der Gleichtaktstörungen ist Gegenstand dieses Artikels.

Anders als bei nicht isolierten DC/DC Wandlern, wie bei einem Tiefsetzsteller, sind bei einem isolierten DC/DC Wandler neben den Gegentaktstörungen auch Gleichtaktstörungen vorhanden. Der Vergleich der Störungsarten ist aus Tabelle 1 ersichtlich.

Bei Gegentakt-Störungen fließt der Störstrom in den Versorgungsleitungen stets in entgegengesetzter Richtung zwischen Spannungsversorgung und Power Modul. Er ist im Wesentlichen der geschaltete Eingangsstrom.

Wie in Abbildung 1 zu sehen, fließt der Störstrom I_{CM} durch die Zwischenwicklungskapazität C_K .

Der Rückweg des Gleichtaktstroms I_{CM} erfolgt über den Massepfad durch die parasitäre Koppelkapazität C_P .

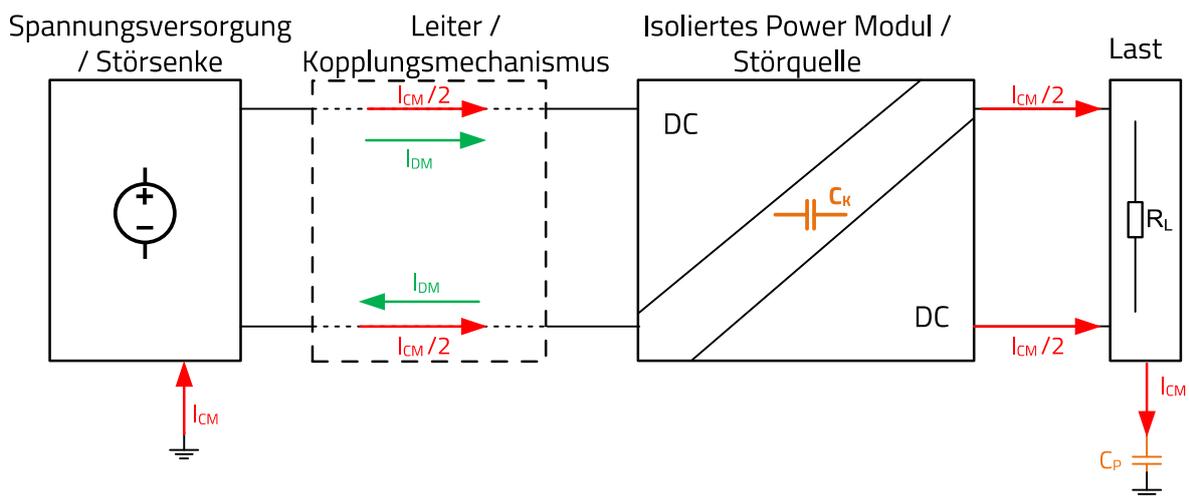


Abbildung 1: Grundlagen zu Gegentakt – und Gleichtaktstörung.

Gegentakt Störungen (I_{DM})	Gleichtakt Störungen (I_{CM})
<ul style="list-style-type: none"> Strom in den Versorgungsleitungen in entgegengesetzter Richtung 	<ul style="list-style-type: none"> Strom in den Versorgungsleitungen in gleicher Richtung
<ul style="list-style-type: none"> Gleiche Orientierung wie der Eingangsstrom vom Power Modul 	<ul style="list-style-type: none"> Hauptsächlich aufgrund eines hohen du/dt der Schaltelemente
<ul style="list-style-type: none"> Dominant bei nicht isolierten Power Modulen 	<ul style="list-style-type: none"> Tritt vor allem bei isolierten Power Modulen auf

Tabelle 1: Vergleich Störungsarten.

APPLICATION NOTE

ANS022 | Brückencondensator für isolierte Power Module, die ganze Wahrheit, keine Mythen

Betrachtet man den Weg des Störstroms, so scheint der Stromkreis sich über die „Luft“ zu schließen. In Wirklichkeit ist es aber der Strom durch die Streukapazität (Aufbau Power Modul, Leitungen zur Referenz Masse) der Anordnung, die hier als Kondensator C_p dargestellt ist.

2. MAGI³C POWER MODUL UND EMV-UMGEBUNG

Isolierte Power Module sind in sehr vielen industriellen Applikationen vertreten. Sei es als Versorgung einer RS485 Schnittstelle, oder einer sensorischen Datenerfassung. Aufgrund der Fülle der verschiedenen möglichen Applikationen und den damit unterschiedlichen Umgebungsbedingungen, also unterschiedliche C_p 's, verwenden wir hier einen genormten Aufbau in Anlehnung an die CISPR 16-2-1, damit eine Vergleichbarkeit der Filter untereinander gewährleistet werden kann.

2.1 Testaufbau basierend auf CISPR 16-2-1

Abbildung 2 veranschaulicht den Aufbau, der die Basis für die Tests in diesem Artikel darstellt.

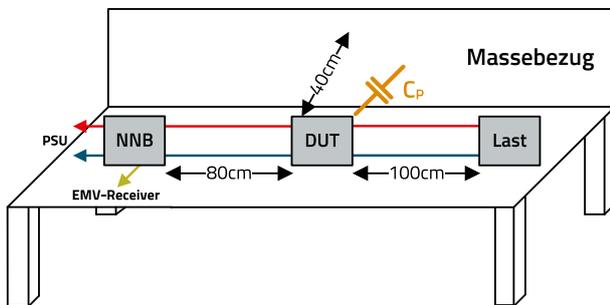


Abbildung 2: EMV-Testaufbau in Anlehnung an die CISPR 16-2-1.

Der Aufbau zeigt die essenziellen Bestandteile, die für eine Messung der Störspannung notwendig sind. Eine detaillierte Beschreibung zum Messaufbau nach CISPR 16-2-1 ist in der Support Note [SNO23 | Leitungsgeführte Störaussendungsprüfung](#) zu finden.

Der Prüfling, d.h. das Device Under Test (DUT) ist hier ein Magi³C Evaluation Board mit einer Größe von 80 x 80 mm. Die Koppelkapazität in Abbildung 2 steht hier stellvertretend für die:

- Parasitäre Kapazitäten des DUT zum Massebezug.
- Parasitäre Kapazität der Last zum Massebezug.
- Parasitäre Kapazität der Lastleitungen zum Massebezug.

Die Koppelkapazität zur Umgebung (Massebezug) bildet den Pfad für den Gleichtaktstrom, um den Stromkreis zu schließen. Die Impedanz der Kapazität ist aber kein fester Wert, sondern variiert mit der Frequenz. Dies spiegelt anschaulich die Formel für den kapazitiver Blindwiderstand $|X_c|$ wider:

$$|X_c| = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (1)$$

- ω – Kreisfrequenz [Hz];
- C – Kapazität [F];
- f – Frequenz [Hz];

In den folgenden zwei Unterkapiteln werden Methoden vorgestellt, um den Wert der Koppelkapazität C_p zu ermitteln. Zur Verdeutlichung werden die jeweiligen Werte anhand eines Zahlenbeispiels ermittelt, das dem Aufbau, der in diesem Artikel verwendet wird, entspricht. Beide Methoden sind ein Mittel zur Näherung und können aufgrund der Komplexität der realen Struktur einer Koppelkapazität keinen exakten Wert liefern.

Die Abbildung 3 zeigt den Aufbau und das Power Modul (Evaluation Board) mit den Komponenten, die für die Gleichtaktbetrachtung relevant sind.

Der Ursprung der Gleichtaktstörungen sind die Schaltelemente auf der Primärseite des Power Moduls. Die geschaltete Spannung V_{noise} treibt einen Strom I_{noise} durch die Zwischenwicklungskapazität C_k des Transformators auf die Sekundärseite des Power Moduls. Die Störströme breiten sich über die Ausgangsleitungen aus und fließen über die Koppelkapazität C_{p2} zum Massebezug (PE). Über den Massebezug und C_{p1} wird dann der Stromkreis zum Eingang des Evaluation Boards geschlossen. Die Ausgangs- und Eingangsleitungen wirken auch als Antennen, was zur "Abstrahlung" von Teilen des Störstroms I_{noise} , führt.

APPLICATION NOTE

ANS022 | Brückenkondensator für isolierte Power Module, die ganze Wahrheit, keine Mythen

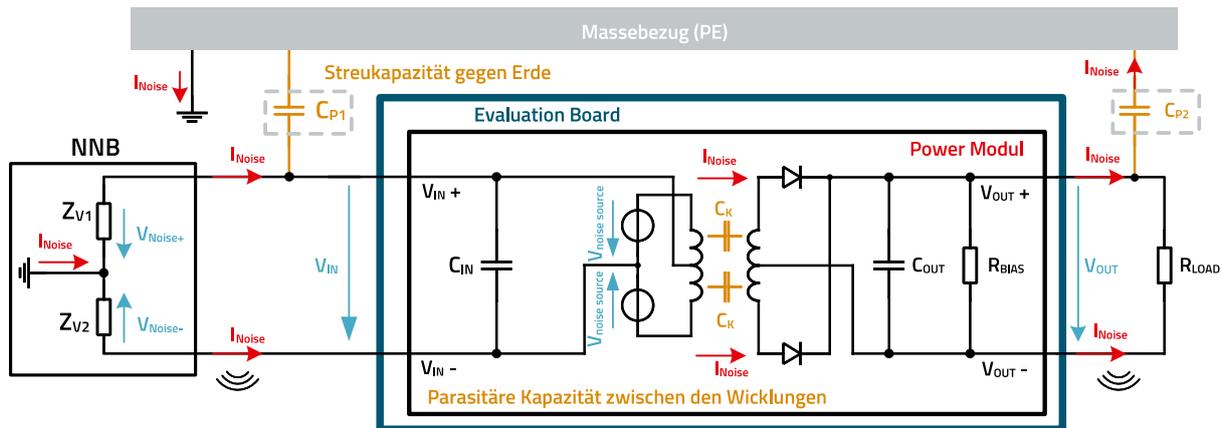


Abbildung 3: Schematischer Messaufbau in Anlehnung an die CISPR-16-2-1.

2.2 Die Koppelkapazität C_p zur Umgebung – theoretische Ermittlung über die Geometrie

Ausschlaggebend für die Bildung einer parasitären Kapazität sind die Flächen und Geometrien unterschiedlicher Potentiale sowie deren Abstand zueinander. Das DUT besteht im betrachteten Fall aus einem Evaluation Board (EVB) mit einer Fläche von 80×80 mm, wobei das verwendete isolierte Modul mit einer ohmschen Last betrieben wird. Die verwendeten Ausgangsleitungen zur Last besitzen eine Länge von 100 cm und der Abstand zur Messplatte (Massebezug) ist 40 cm. Für die Ermittlung der Koppelkapazität C_p sind somit zwei Fälle zu betrachten. Fall 1, die Kopplung des Evaluation Boards zur Messplatte und Fall 2, die Kopplung der Ausgangsleitungen zur Messplatte, entsprechend der Abbildung 3.

Hierdurch können wir die beiden in Abbildung 3 dargestellten und in Abbildung 4 berechneten Fälle als Grundlage für die

Bestimmung der Koppelkapazität heranziehen. Der Einfluss der ohmschen Last, in diesem Fall durch einen Schiebewiderstand repräsentiert, wurde nicht berücksichtigt.

2.3 Die Koppelkapazität C_p zur Umgebung – messtechnische Ermittlung über die Resonanz

Ein messtechnischer Ansatz ist, der Koppelkapazität zur Umgebung eine definierte Induktivität in Reihe zu schalten und somit einen Reihenschwingkreis aufzubauen. Über die Frequenz bei Resonanz und der Formel für den Reihenschwingkreis kann dann das gesuchte C_p berechnet werden.

Die Größe der eingefügten Induktivität bemisst sich an den bereits vorhandenen Induktivitätswerten wie Trafo, Leitungen, Kupferbahnen etc. Für das Power Modul, das wir hier betrachten, haben wir je eine **PD2**-Induktivität mit $15 \mu\text{H}$ sowohl in die Plus- wie auch in die Minusleitung des Power

Fall 1: Kopplung EVB zur Messplatte	Fall 2: Kopplung Ausgangsleitungen zur Messplatte
$C_p = \epsilon \cdot \frac{A}{d} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V} \cdot \text{m}} \cdot \frac{1 \text{ m}^2}{0,4 \text{ m}} = 2,2 \cdot 10^{-11} \text{ F} = 22 \text{ pF}$	$C_p = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot l}{\text{arcosh}\left(\frac{d}{R}\right)} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \text{ m}}{\text{arcosh}\left(\frac{0,4 \text{ m}}{0,000564 \text{ m}}\right)}$ $C_p = 7,62 \cdot 10^{-12} \text{ F} = 7,6 \text{ pF}$

Abbildung 4: Beispiele für Koppelkapazitäten.

APPLICATION NOTE

ANS022 | Brückenkondensator für isolierte Power Module, die ganze Wahrheit, keine Mythen

Modul Eingangs eingefügt. Wichtig ist hier, den Induktivitätswert nicht zu groß zu wählen, da ansonsten die Induktivität das Power Modul beeinflusst und somit keine Messung bei Normalbetrieb erfolgen würde. Andererseits muss die Induktivität aber groß genug in Bezug auf die Leitungsinduktivität sein, damit diese bei der Betrachtung vernachlässigt werden kann.

Die Analyse der Messungen in Abbildung 5 zeigt, dass es eine Resonanzstelle bei ca. 15 MHz gibt.

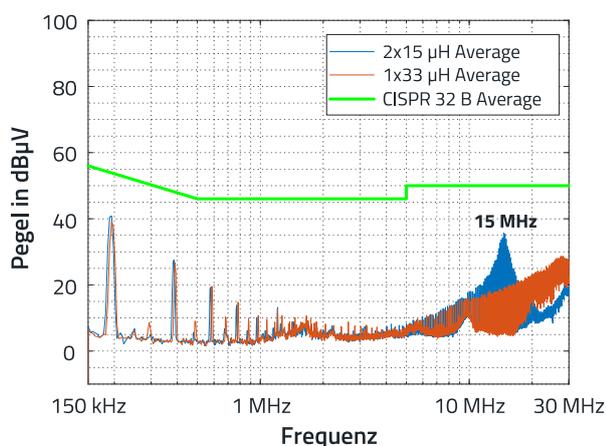


Abbildung 5: EMV-Plot mit Resonanzstelle der leitungsgebundenen Störspannung.

Über die Resonanzfrequenz und der eingefügten Induktivität kann der Wert der parasitären Kapazität berechnet werden. Durch die Ausgangskapazität befinden sich beide Ausgangsleitungen im hochfrequenten Bereich auf dem gleichen Potential, sodass sie für die Berechnung gemeinsam als einzelne Leitung angesehen werden können. Die Gesamtinduktivität L entspricht der Parallelschaltung von den beiden eingebrachten $15 \mu\text{H}$ Induktivitäten, damit ergibt sich für die Berechnung der parasitären Kapazität ein Wert von $7,5 \mu\text{H}$.

Die Formel für den Reihenschwingkreis, umgestellt nach C_p , liefert den gesuchten Wert:

$$C_p = \frac{1}{L \cdot (2 \cdot \pi \cdot f_{\text{res}})^2} \quad (2)$$

$$C_p = \frac{1}{7,5 \cdot \mu\text{H} \cdot (2 \cdot \pi \cdot 15 \text{ MHz})^2} = 15 \text{ pF} \quad (3)$$

Die erste Abschätzung des C_p mit 22pF basierend auf der reinen geometrischen Betrachtung, siehe Abbildung 4: Fall 1, ist somit hinreichend genau. Die Abweichung zum messtechnisch ermittelten Wert ist dem Einfluss der Last und des Aufbaus an sich geschuldet.

3. GLEICHTAKTENTSTÖRUNG MIT BRÜCKENKONDENSATOR

3.1 Die Intention zur Filterung

Der eleganteste Weg die EMV-Prüfung zu bestehen ist es die Störungen, hier die Gleichtaktstörungen, erst gar nicht bis zur Netznachbildung (NNB), kommen zu lassen. Für den Aufbau mit einem isolierten Power Modul bedeutet dies, dass der Störstrom, bevor er die NNB erreicht, über einen zusätzlichen Kondensator vorbeigeleitet wird. Aber was bedeutet das für den hier zu betrachtenden Fall? Abbildung 6 ist eine vereinfachte Darstellung des realen Aufbaus, wie er in Abbildung 3 bereits gezeigt wurde. Die Abbildung veranschaulicht die Grundlagen, auf denen die Herleitung der Gleichung für die Berechnung eines Brückenkondensators zur Gleichtaktentstörung beruht.

Die Abbildung 6 zeigt beide (Pfad 1 & Pfad 2) Störstromschleifen. Der rot gekennzeichnete „Pfad 2“ veranschaulicht den Weg des Gleichtaktstörstromes der über C_k durch das Power Modul fließt und seinen Stromkreis über die Masse schließt.

Pfad 1, hier in blau gekennzeichnet, zeigt eine alternative Schleife. Der Strom fließt durch das Power Modul und macht dann einen „Bogen um das Power Modul“. Der Störstrom fließt so an der NNB vorbei.

Zusammengefasst bedeutet das:

- Der Störstrom zirkuliert innerhalb des Power Moduls und kann nicht in das umgebende System fließen.
- Kein Störstrom durch die NNB bedeutet kein Störpotenzial an der NNB.

Aber warum sollte der Störstrom den Abzweig wählen?

Pfad 1 muss für I_{NOISE} „attraktiver“ sein als Pfad 2, d.h. er muss niederimpedanter sein als Pfad 2. Somit kommt nur ein Kondensator als Bauteil in Frage, siehe hierzu Formel 1.

Pfad 1 ist somit die resultierende Störschleife im und um das Power Modul herum.

APPLICATION NOTE

ANS022 | Brückenkondensator für isolierte Power Module, die ganze Wahrheit, keine Mythen

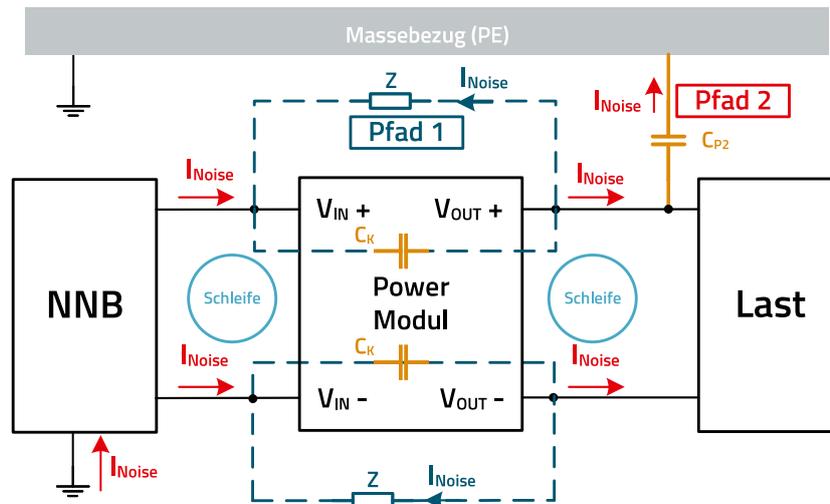


Abbildung 6: Ersatzschaltbild mit Darstellung der Störströme. 1 - Gleichtaktstrom mit Abzweigung, 2 - Gleichtaktstrom ohne Abzweigung.

Das Ersatzschaltbild lässt sich nun um ein reales Bauteil für die Abzweigung wie folgt erweitern.

Das in Abbildung 7 dargestellte Ersatzschaltbild wurde bereits um die erforderlichen Elemente erweitert, da es die Grundlage für die nachfolgende Bestimmung der Gleichungen bildet. Die in grau dargestellten Eingangs – und Ausgangskapazitäten des Power Moduls symmetrieren, d.h. verteilen die Gleichtaktstörströme, sodass anstelle von zwei nur noch ein C_Y nötig ist.

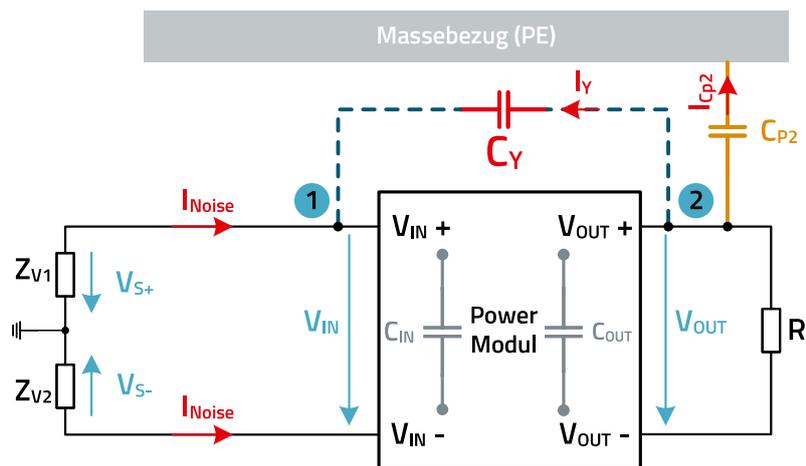


Abbildung 7: Ersatzschaltbild mit kapazitiver Abzweigung der Common-Mode Störung.

APPLICATION NOTE

ANS022 | Brückenkondensator für isolierte Power Module, die ganze Wahrheit, keine Mythen

3.2 EMV trifft auf kirchhoffsches Gesetz

Um die Effizienz der Maßnahme mit dem Y-Kondensator zu erfassen, soll der Stromkreis ohne Abzweigung mit dem Stromkreis der implementierten Abzweigung verglichen werden. Das heißt, wir vergleichen den Spannungsabfall des Störstroms an der NNB mit Brückenkondensator mit dem Spannungsabfall ohne Brückenkondensator. Das Verhältnis, ausgedrückt in dB, ist dann die Dämpfung a. (Abbildung 8)

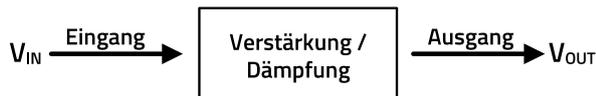


Abbildung 8: Grundkonzept zur Berechnung der Dämpfung.

In diesem Fall werden die Konfiguration ohne Y-Kondensator (Amplitude A1) mit der Konfiguration mit Y-Kondensator (Amplitude A2) miteinander verglichen:

- Dämpfung a = a2 - a1 in dB.
- Dämpfung a = 20 · Log (Spannungsabfall mit Brückenkondensator) - 20 · Log (Spannungsabfall NNB ohne Brückenkondensator) dB.
- Dämpfung a = 20 · Log $\left(\frac{\text{Spannungsabfall NNB mit Brückenkondensator } (V_2)}{\text{Spannungsabfall NNB ohne Brückenkondensator } (V_1)} \right)$ dB

Für die weitere Berechnung wird der Faktor A benutzt, der das Verhältnis aus „Spannungsabfall an der NNB mit Brückenkondensator“ zu „Spannungsabfall an der NNB ohne Brückenkondensator“ darstellt.

$$A = \frac{V_2}{V_1} \tag{4}$$

Um den Wert des Brückenkondensators zu ermitteln, müssen wir nun das bekannte Schaltbild in ein vereinfachtes elektrisches Ersatzschaltbild umwandeln, auf das wir dann das Kirchhoffsche Gesetz anwenden können. Das Kirchhoffsche Gesetz besteht aus zwei grundlegenden Regeln: Die Knotenregel (1. Kirchhoffsche Gesetz) besagt, dass in einem Knotenpunkt die Summe der zufließenden Ströme gleich der Summe der abfließenden Ströme ist. Die Maschenregel (2. Kirchhoffsche Gesetz) besagt, dass in einer geschlossenen Schleife die Summe der Spannungen gleich null ist. Basierend auf der Abbildung 7 können zwei vereinfachte Ersatzschaltbilder (Abbildung 9 & 10) erstellt werden. Hierbei werden die Zuleitungen zum Power Modul zu einer einzelnen Leitung entsprechend der Parallelschaltung vereinfacht. ZV repräsentiert die beiden Impedanzen ZV1 und ZV2 der NNB (dargestellt in Abbildung 7). Die Impedanz der parasitären Koppelkapazität zwischen Primär- und Sekundärseite des

Übertragers im Power Modul ist die Impedanz ZK. Die Kapazität CP2 repräsentiert die gesamte parasitäre Kapazität auf der Sekundärseite darstellt und gilt gleichermaßen für beide Leitungen. VS steht stellvertretend für alle im Power Modul befindlichen Gleichtaktstörspannungsquellen, siehe Abbildung 3 Vnoise source. ZY ist die Impedanz des Brückenkondensators der VOUT+ zu VIN+ verbindet und parallel zur Impedanz ZK liegt.

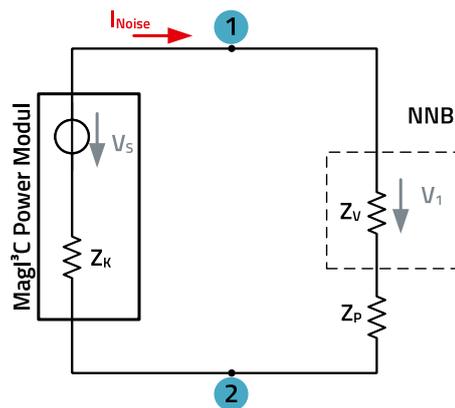


Abbildung 9: Ersatzschaltbild, Spannungsabfall ohne Brückenkondensator.

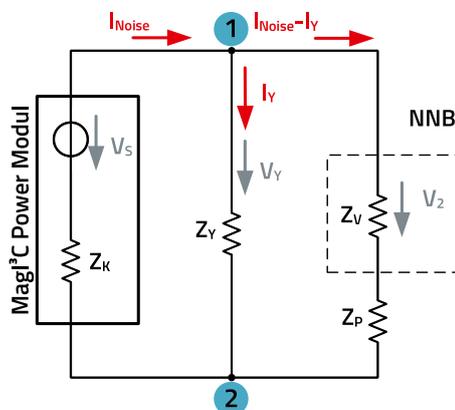


Abbildung 10: Ersatzschaltbild, Spannungsabfall mit einem Brückenkondensator der Impedanz ZY.

APPLICATION NOTE

ANS022 | Brückenkondensator für isolierte Power Module, die ganze Wahrheit, keine Mythen

Spannungsabfall ohne Brückenkondensator:

Die NNB, die parasitäre Kapazität und das Magi³C-Power Modul sind hier in Reihe geschaltet. Wir können also V_1 mit Hilfe der bekannten Formel für einen Spannungsteiler berechnen. Wenn wir nun die Grundgleichung für die Reihenschaltung entsprechend der gesuchten Spannung V_1 umstellen, erhalten wir folgende Gleichung, die den Spannungsabfall über der NNB darstellt.

$$V_1 = V_S \cdot \frac{Z_V}{Z_K + Z_P + Z_V} \quad (5)$$

V_1, V_2 – Spannungsabfall an der NNB;
 Z_K – Impedanz der Wickelkapazität;
 Z_P – Impedanz der parasitären Kopplungskapazität;
 Z_V – Impedanz der NNB;
 V_Y – Spannungsabfall am Brückenkondensator;
 Z_Y – Impedanz des Brückenkondensators.
 V_S – Gleichtaktstörspannungsquelle

Spannungsabfall mit Brückenkondensator:

Im Folgenden ist der Stromkreis eine Mischung aus einer Reihen- und einer Parallelschaltung. Z_Y , der Brückenkondensator, ist parallel zur NNB und der parasitären Kapazität geschaltet. Der parallel geschaltete Zweig ist dann in Reihe mit dem Magi³C-Power Modul geschaltet.

Wird nun die Grundgleichung für die Parallelschaltung und die Reihenschaltung entsprechend der gesuchten Spannung V_2 umgestellt, erhalten wir die Gleichung, die den Spannungsabfall über der NNB darstellt, wenn der Brückenkondensator implementiert wird.

$$V_2 = V_S \cdot \frac{Z_Y}{Z_K + Z_Y \parallel (Z_V + Z_P)} \cdot \frac{Z_V}{Z_P + Z_V} \quad (6)$$

V_1, V_2 – Spannungsabfall an der NNB;
 Z_P – Impedanz der parasitären Kopplungskapazität;
 Z_V – Impedanz der NNB;
 V_Y – Spannungsabfall am Brückenkondensator.

Wenn wir nun die Gleichung für V_1 und V_2 in die Dämpfungsgleichung einsetzen, erhalten wir den benötigten Ausdruck.

$$A = \frac{Z_Y \cdot (Z_K + Z_P + Z_V)}{(Z_K + Z_Y \parallel (Z_V + Z_P)) \cdot (Z_V + Z_P)} \quad (7)$$

Diese Gleichung kann für unsere Zwecke noch weiter vereinfacht werden. Kapitel 5.1. Gültigkeit der Vereinfachung

zeigt die genaue Herleitung für die Vereinfachung sowie den zu erwartende Fehler anhand eines Zahlenbeispiels.

$$A = \frac{Z_Y}{Z_K} \quad (8)$$

$$\text{Dämpfung } a = 20 \cdot \log \left(\frac{Z_Y}{Z_K} \right) \text{ dB} \quad (9)$$

4. PRAKTISCHES BEISPIEL MIT EINEM REALEN MAGI³C POWER MODUL

Zur Veranschaulichung der Faustformel, wird basierend auf einem Störspannungsergebnis eines SIP-4 Power Moduls eine Beispielrechnung Schritt für Schritt durchgeführt.

Die elektrischen Kenndaten sind: $V_{IN} = 12 \text{ V}$, $V_{OUT} = 5 \text{ V}$, $I_{OUT} = 200 \text{ mA}$ (Order Code: [177920521](#)).

Abbildung 11 zeigt das Ergebnis der Störspannungsmessung.

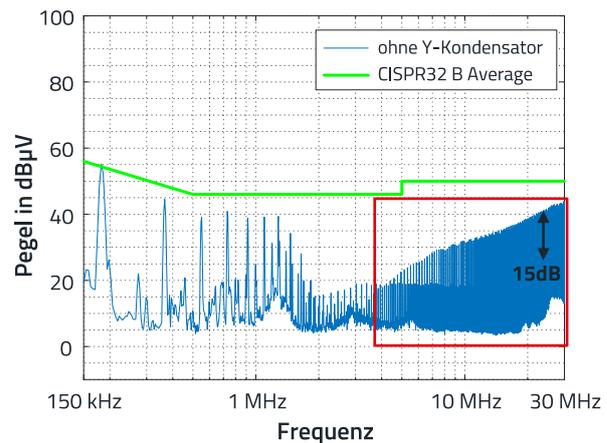


Abbildung 11: Störspannungsprotokoll, SIP-4 Power Modul, ohne Y-Kondensator

Die Berechnung basiert auf einer Stromzangenmessung, der hier betrachtete Frequenzbereich für die Gleichtaktstörungen liegt zwischen 4 MHz und 30 MHz. Im Frequenzbereich unter 4 MHz wird die Störspannung durch die Gegentaktstörung bestimmt. In Abbildung 11 ist zu erkennen, dass im Frequenzbereich um 30 MHz der Abstand der Störspannung zum Grenzwert nach CISPR 32 ca. 12 dBµV beträgt. Für die weitere Auslegung wird eine Dämpfung von 15dB im Bereich 20 bis 30MHz zugrunde gelegt, siehe Abbildung 11.

Schritt 1:

Bestimmung der angestrebten Dämpfung im Frequenzbereich von 4 MHz bis 30 MHz.

APPLICATION NOTE

ANS022 | Brückenkondensator für isolierte Power Module, die ganze Wahrheit, keine Mythen

Schritt 2:

Bestimmung der Koppelkapazität zwischen den Wicklungen des Transformators des Power Moduls. Den Wert für die Koppelkapazität zwischen den Wicklungen kann dem Datenblatt des Power Moduls entnehmen werden.

Der Wert wird in der Regel als Maximalwert, d. h. als Worst-Case-Wert, angegeben. Bei dem SIP-4 Power Modul sind 75 pF für C_{iso} , also für C_K angegeben.

Der Wert für C_{iso} wird typischerweise bei einer Messfrequenz von 100 kHz ermittelt. Für unsere Berechnung kann aber C_K bis 30 MHz als stabil angesehen werden.

Schritt 3:

Berechnung des Wertes für den Brückenkondensator, basierend auf der vereinfachten Gleichung.

$$A = \frac{Z_Y}{Z_K} \quad (10)$$

Umwandlung von der geforderten Dämpfung von 15 dBV logarithmisch in einen linearen Wert.

$$A = 10^{\left(\frac{x \text{ dB}}{20}\right)} = 10^{\left(\frac{-15 \text{ dB}}{20}\right)} = 0,177 \quad (11)$$

Daraus ergibt sich dann ein Brückenkondensatorwert von:

$$C_Y = \frac{C_K}{d} = \frac{75 \text{ pF}}{0,177} = 421 \text{ pF} \approx 470 \text{ pF} \quad (12)$$

Der Wert $C_Y = 470 \text{ pF}$ wurde gewählt da er einem diskreten Bauteil Wert entspricht.

Schritt 4:

Verifizierung des Wertes für den Brückenkondensator anhand einer realen leitungsgebundenen EMV-Messung, das Ergebnis zeigt Abbildung 12.

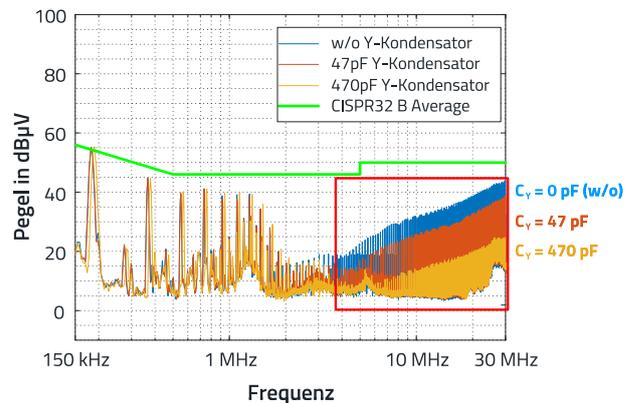


Abbildung 12: Messung der leitungsgebundenen Störspannung mit verschiedenen Brückenkondensatoren.

APPLICATION NOTE

ANS022 | Brückenkondensator für isolierte Power Module, die ganze Wahrheit, keine Mythen

Je größer die Kapazität des Brückenkondensators ist, desto höher ist die resultierende Dämpfung im Frequenzbereich über 3 MHz, da der Pfad für den Störstrom eine niedrigere Impedanz hat. Es zeigt sich auch, dass die Dämpfung mit der realen Kapazität höher ist als der berechnete Wert. Die Berechnung ergab eine Dämpfung von 17,2 dB für einen Brückenkondensator mit einer Kapazität von 470 pF. Die Messung zeigt jedoch eine Dämpfung von fast 19 dB. Das ist ein Unterschied von 2 dB, der auf die parasitäre Koppelkapazität C_K des Transformators zurückzuführen ist, der die tatsächliche Dämpfung verändert. Das Datenblatt gibt nur einen Maximalwert an. In der Praxis ist die Koppelkapazität zwischen den Wicklungen des Übertragers jedoch geringer als 75 pF, sie beträgt nur 60 pF.

Die Abweichung zwischen dem berechneten und dem gemessenen Wert kann aber auch durch die Messunsicherheit, Vereinfachungen im Modell und die Bauteiltoleranzen zustande kommen.

5. GRENZEN DER FAUSTFORMEL & FAZIT

Der Brückenkondensator wirkt als niederimpedanter Bypass und minimiert den Störstrom zur Netznachbildung (NNB). Der Kondensator kann aber aufgrund seiner Eigenschaften als frequenzabhängige Impedanz nicht über das gesamte Frequenzspektrum des Messbereichs der leitungsgebundenen Störspannung den Störstrom „fernhalten“. Der Gegenspieler zum Brückenkondensator ist die Koppelkapazität C_P zur Umgebung. Sie wird maßgeblich durch den Abstand des Aufbaus zur Masseplatte aber auch durch die Länge der Ausgangsleitungen beeinflusst. Der Brückenkondensator kann nur dann den Störstrom wirksam umleiten, wenn seine Kapazität viel größer ist als die der Koppelkapazität zur Umgebung.

5.1 Gültigkeit der Vereinfachung

Die Grenzen der Vereinfachung werden anhand eines numerischen Beispiels erläutert. Für das Beispiel werden folgende Werte für die beteiligten Größen gewählt:

Parasitäre Koppelkapazität zur Umgebung C_P :
 $C_P = 20 \text{ pF} \rightarrow Z_P = 795 \Omega @ 10 \text{ MHz}$.

Brückenkondensator C_Y :
 $C_Y = 470 \text{ pF} \rightarrow Z_Y = 34 \Omega @ 10 \text{ MHz}$

Parasitäre Wicklungskapazität C_K :
 $C_K = 75 \text{ pF} \rightarrow Z_K = 212 \Omega @ 10 \text{ MHz}$

Impedanz der NNB Z_V : $Z_V = 25 \Omega$

Die Gleichung für die gesuchte Dämpfung A ergibt sich dann zu:

$$A = \frac{Z_Y \cdot (Z_K + Z_P + Z_V)}{(Z_K + Z_Y \parallel (Z_V + Z_P)) \cdot (Z_V + Z_P)} \quad (13)$$

$$A = \frac{Z_K + Z_P + Z_V}{Z_K + Z_P + Z_V + \frac{Z_K}{Z_Y} \cdot (Z_P + Z_V)} \quad (14)$$

$$A = \frac{212 \Omega + 795 \Omega + 25 \Omega}{212 \Omega + 795 \Omega + 25 \Omega + \frac{212 \Omega}{34 \Omega} \cdot (795 \Omega + 25 \Omega)} \quad (15)$$
$$A = \frac{1032 \Omega}{1032 \Omega + \frac{212 \Omega}{34 \Omega} \cdot 820 \Omega} \quad (15)$$
$$A = 0,1679 = 0,168$$

Auffällig in der Gleichung ist, dass der Zähler sowie der Nenner mit ihren Werten nahe beieinanderliegen. Zur besseren Lesbarkeit sind diese rot markiert.

$$A = \frac{1032 \Omega}{1032 \Omega + \frac{212 \Omega}{34 \Omega} \cdot 820 \Omega} \quad (16)$$

Die rot markierten Werte sind alle ca. 1000. Ersetzen wir nun die Werte durch 1000 kann die Gleichung wie folgt vereinfacht werden.

$$A = \frac{1000 \Omega}{\left(1 + \frac{212 \Omega}{34 \Omega}\right) \cdot 1000 \Omega} \quad (17)$$

Die 1 in der Klammer im Nenner kann gestrichen werden, da sie mehr als 6-mal niedriger ist als $212 \Omega / 34 \Omega$.

$$A \approx \frac{34 \Omega}{212 \Omega} \approx 0,16 \quad (18)$$

APPLICATION NOTE

ANS022 | Brückenkondensator für isolierte Power Module, die ganze Wahrheit, keine Mythen

Variante lange Formel:	Variante kurze Formel
$a = 20 \cdot \text{Log}(0,168) = -15,49 \text{ dB}$	$a = 20 \cdot \text{Log}(0,16) = -15,91 \text{ dB}$
$\Delta a = -0,42 \text{ dB}$	

Tabelle 2: Gegenüberstellung der beiden Varianten

Werden so die Ergebnisse der beiden Varianten der Formel verglichen, ergibt sich folgender Unterschied: siehe Tabelle 2.

Um diesen Effekt bzw. Sachverhalt noch besser beurteilen zu können dient folgende Abbildung 13:

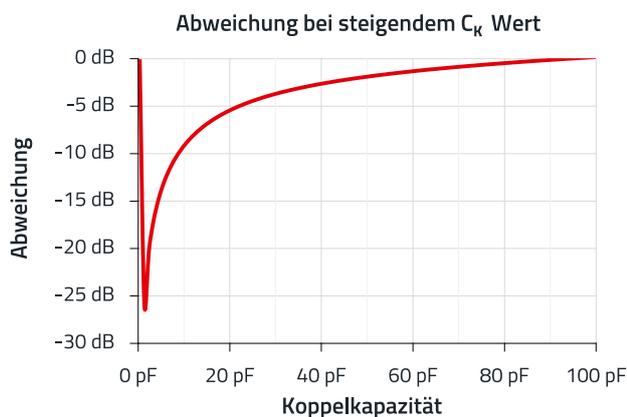


Abbildung 13: Abweichung in Abhängigkeit der parasitären Koppelkapazität C_P und der parasitären Wicklungskapazität C_K .

Der Graph zeigt deutlich, dass der Fehler bei der Anwendung der „kurzen Formel“ umso größer wird, je näher die Koppelkapazität C_K des Transformators an den ermittelten Wert der parasitären Koppelkapazität C_P herankommt.

5.2 Fazit

Die große Wirkung eines Brückenkondensators zur Reduzierung der Gleichtakt-Störspannung wurde messtechnisch bewiesen. Die Messungen haben weiter deutlich gezeigt, dass der theoretische Ansatz über die ermittelte Formel ein guter Weg ist, um einen Startwert für einen Brückenkondensator zu ermitteln. Die Formel kann in ihrer langen Form immer benutzt werden da sie keine Vereinfachung hat, die auf den Verhältnissen zwischen C_P und C_K beruht. Lediglich bei Anwendung der kurzen Formel muss auf das Verhältnis zwischen C_P und C_K geachtet werden da es essenziell auf die Wirksamkeit der Formel Einfluss hat.

APPLICATION NOTE

ANS022 | Brückenkondensator für isolierte Power Module, die ganze Wahrheit, keine Mythen

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 Todesfälle 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

www.we-online.com/appnotes



REDEXPERT Design Platform

www.we-online.com/redexpert



Toolbox

www.we-online.com/toolbox



Produkt Katalog

www.we-online.com/products

KONTAKT INFORMATION



appnotes@we-online.com

Tel. +49 7942 945 - 0



Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG

Max-Eyth-Str. 1 74638 Waldenburg Germany

www.we-online.com

APPLICATION NOTE

ANS022 | Brückenkondensator für isolierte Power Module, die ganze Wahrheit, keine Mythen

REVISIONSHISTORIE

Dokument Version	Veröffentlichungsdatum	Änderungen
ANS022a	2025/04/16	Ursprüngliche Version der Application Note

Hinweis: Die aktuelle Version des Dokuments und das Veröffentlichungsdatum sind in der Fußzeile jeder Seite dieses Dokuments angegeben.