

APPLICATION NOTE

ANS023 | Transientenschutz SIP-3



Timur Uludag

1. EINLEITUNG UND THEORETISCHER HINTERGRUND

In industriellen Umgebungen treten häufig transiente Überspannungen aufgrund der umfangreichen elektrischen Infrastruktur auf.

Für die Entwicklung eines effizienten Filters zur Begrenzung transienter Überspannungen, müssen viele Einflussparameter berücksichtigt werden.

Viele industrielle Anwendungen arbeiten heute mit logischen Eingangsspannungen wie 5 V_{DC} oder niedriger, wie in Abbildung 1 dargestellt. Das Stromverteilungssystem, zur Versorgung der Anwendungen wird häufig mit einer DC-Busspannung von 24 V_{DC} gespeist. Üblicherweise werden schaltende DC/DC-Wandler für die Umwandlung der höheren Zwischenkreisspannung auf die niedrigere Spannung verwendet.

Abbildung 1 zeigt die grundlegende elektrische Struktur einer Industrieanlage. Die einzelnen Teile der Anwendungen werden über einen DC-Bus versorgt. Vor Ort wird jeder einzelne elektrische Verbraucher über eine Unterverteilung mit 24 V verbunden. Nicht isolierte Power Module werden zur Bereitstellung der Betriebsspannung aller Teilsysteme eingesetzt.

1.1 Herkunft der transienten Überspannung

Transiente Überspannung können definiert werden als kurzfristige Abweichungen von einem Spannungsnennwert, der den zulässigen Toleranzbereich der Nennspannung in einem elektrischen System innerhalb einer kurzfristigen Zeit überschreitet. Die Auswirkungen der transienten Überspannungen sind meist zerstörerisch.

In erster Linie gibt es mehr als eine mögliche Ursache für eine transiente Überspannung auf dem Zwischenkreis, die zu einem abrupten Anstieg führt. Der Ursprung der Überspannung kann ein Blitzeinschlag sein (Abbildung 1, Teil A), in diesem Fall spricht man von einem „Surge“, oder sie kann im System selbst erzeugt werden (Abbildung 1, Teil B). Klassischerweise wird am Ausgang von SMPS (DIN Rail Power Supply) einen „Surge“ gemäß EN 61000-4-5 zwischen dem positiven und dem negativen Anschluss mit einem Wert zwischen 500 V und 1 kV angegeben.

Da der Ausgang des DIN-Schienen-Netzteils direkt mit dem Eingang des DC/DC-Wandlers verbunden ist, muss dieser den gleichen Prüfschärfegrad aufweisen. Unsachgemäßer und nicht vorhandener Überspannungs-/Transientenschutz

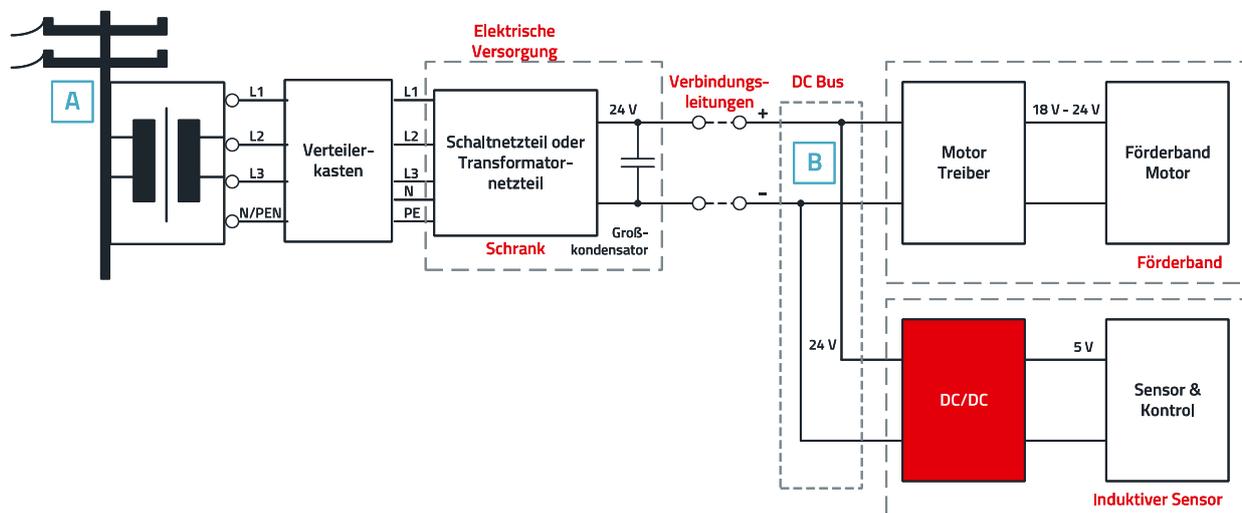


Abbildung 1: In industriellen Umgebungen werden die einzelnen Elemente einer Anlage in der Regel über einen Gleichstrombus versorgt.

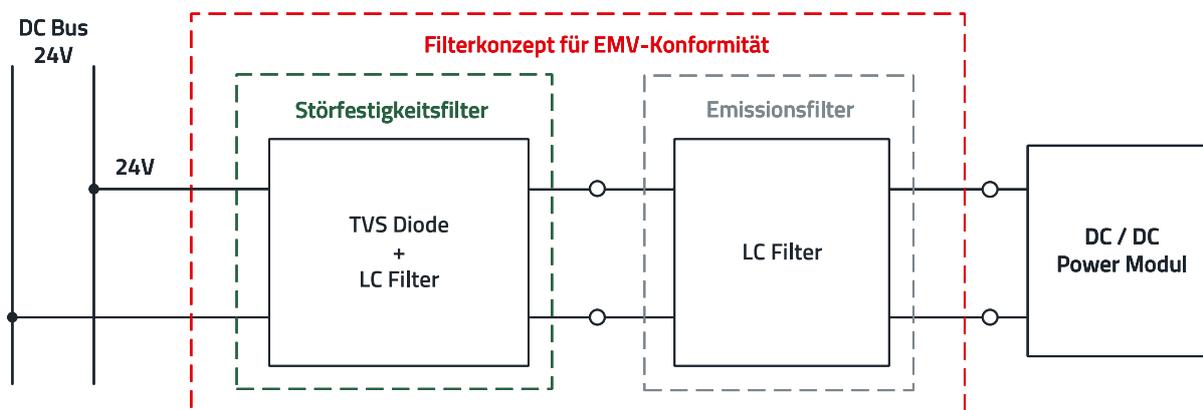


Abbildung 2: Filterkonzept für die EMV-Konformität von Mag¹³C-Power Module mit Störfestigkeit und Emissionsfilter.

führt zu Fehlfunktionen aufgrund von elektrischen Schäden am DC/DC-Wandler, was zu höheren Systemausfallzeiten und Kosten führt. Für eine korrekte Berechnung muss ein normierter transienter Impuls verwendet werden, wie er in der Norm IEC 61000-4-5 als sogenannter Surge definiert ist.

1.2 Filter Konzept

Abbildung 2 zeigt das gesamte Immunitätsfilterkonzept (grün), das zwei Filterstufen umfasst. Eine Stufe dient zum Abfangen der hohen transienten Überspannung, während eines Überspannungsereignisses, was mit Transientenunterdrückerkomponenten wie unidirektionalen TVS-Dioden erreicht werden kann. Für die zweite Stufe wird ein passiver LC-Filter empfohlen, der die Spannungen abschwächt, die die maximale Betriebsspannung des DC/DC-Wandlers überschreiten.

Zu Optimierungszwecken können die beiden Filterstufen zu einer Filterstufe zusammengefasst werden, die sowohl die Störfestigkeit als auch den Emissionsfilter umfasst. Diese Application Note zielt auf den schrittweisen Ansatz mit zwei separaten Filterstufen ab, da dies die einfachste Variante ist.

2. GRENZEN DES STÖRFESTIGKEITSFILTERS

Der kritischste Parameter eines Schaltreglers, der für den Entwurf eines Transientenfilters benötigt wird, ist die Eingangsspannung. In vielen Fällen sind zwei verschiedene Werte im Datenblatt in den Kapiteln „ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS“ und „OPERATING CONDITIONS“ angegeben. Der Wert in den „ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS“ ist die absolute maximale Eingangsspannung V_{PM_MAX} , die bei Überschreitung zu einer dauerhaften Beschädigung des Powermoduls führt. Die andere ist die maximale Betriebsspannung, die der vom

Hersteller spezifizierte maximale Eingangsspannung entspricht, die

für die das Power Modul ordnungsgemäß verwendet werden kann. Zum Schutz vor transienten Überspannungen wird empfohlen den Immunitätsfilter so auszulegen, dass auch bei transienten Überspannungsereignissen die absolute Eingangsspannung des Power Moduls niemals die absolute maximale Eingangsspannung V_{PM_MAX} überschreitet.

Für weitere Berechnungen wurde das [173010535](#) SIP-3 Power Modul mit einer absoluten maximalen Eingangsspannung von $V_{PM_MAX} = 44$ V als Beispiel verwendet [1].

2.1 Störfestigkeit Filter Design

In diesem Artikel wird die Verwendung einer unidirektionalen TVS-Diode als Schutzelement für den Eingang des Powermoduls betrachtet. Unidirektionales Betriebsverhalten bedeutet, dass die VI-Charakteristik fast die gleiche ist wie die einer Zener-Diode. Daher wird die Diode normalerweise in Sperrichtung verwendet. Bei Überschreiten der spezifischen Durchbruchspannung des Bauteils wird die TVS-Diode leitend.

Die Höhe der Klemmspannung wird dann durch den Strom bestimmt, der durch das Bauelement fließt. Das folgende Zahlenbeispiel bietet eine vereinfachte, praktische Anleitung zur Erstellung eines Filters. Die Filterabschätzung ermöglicht einen schnellen Verfeinerungszyklus bei der Durchführung realer Anwendungstests.

Um einen geeigneten Entwurf auf der Grundlage einer TVS-Diode für einen Transientenschutz des Leistungsmoduls zu erstellen, sind die folgenden Parameter erforderlich.

- V_{DC} , Versorgungsspannung des Power Moduls
- V_{BR} , Spannung bei der 1 mA Strom durch die TVS-Diode fließt
- I_{PEAK} , maximaler Spitzenstrom, der durch die TVS-Diode fließt @ V_{CLAMP_MAX}
- P_{DISS} , maximale Verlustleistung der TVS Diode
- V_{CLAMP_MAX} , Spannung, bei der die Diode den angegebenen I_{peak} führt

2.2 Erste Störfestigkeitsfilterstufe

Bestimmung von V_{DC}

Für den V_{DC} Wert ist die maximale auftretende DC-Busspannung entscheidend, nicht der Nennwert. Bei einem 24-V-Bus ist in industriellen Umgebungen ein Spannungsbereich von 19,2 bis 30 V spezifiziert. Folglich beträgt der maximale Wert für V_{DC} 30 V. Die Auswahl der TVS-Diode für die nächsten Schritte Berechnungsschritte basiert auf den verfügbaren Bauteilen aus dem Produktportfolio von Würth Elektronik. Für die weitere Berechnung wird die TVS-Diode 824550301^[2] gewählt da sie den Anforderungen am nächsten kommt.

Bestimmung von V_{BR}

V_{BR} ist definiert als die Spannung, bei der ein Strom von 1 mA durch die TVS-Diode fließt, Dieser Wert, in diesem Fall 35,05 V, ist nicht genau festgelegt, da es sich um einen PN-Übergang handelt, dessen Spannung aufgrund von Toleranzen und Betriebsbedingungen leicht schwanken kann Die Toleranz ist im Datenblatt mit $\pm 5\%$ angegeben. Das führt zu einem VBR von 33,33 V bis 36,80 V. In diesem Bereich beginnt die Diode mit einem Strom von 1 mA zu leiten.

Es ist jedoch auch notwendig, den Wert zu kennen, bei dem die transiente Spannung geklemmt werden sollte. Dieser wird durch den Parameter V_{CLAMP_MAX} dargestellt.

Bestimmung von V_{CLAMP_MAX}

Dieser Wert kann auch dem Datenblatt entnommen werden. Für die gewählte Diode beträgt die Spannung 48,4 V bei einem Spitzenstrom von I_{PEAK} von 31 A, was einem 10/1000 μs -Impuls entspricht.

Bislang wurde bei den Berechnungen von einer idealen Laborumgebung mit einer kontrollierten Umgebungstemperatur von 25 °C ausgegangen. Die Realität sieht jedoch anders aus. Erfahrungsgemäß ist eine Umgebungstemperatur von bis zu 55 °C für elektronische Bauteile wie eine TVS-Diode üblich.

Daher muss die Berechnung mit einen Temperaturfaktor modifiziert werden.

Vor allem V_{CLAMP_MAX} und die Pulsspitzenleistung sind stark von der Temperatur abhängig.

Gleichung (1) zeigt den Temperatureinfluss auf V_{CLAMP_MAX} .

$$V_{CLAMP_MAX}(T_j) = V_{CLAMP_MAX}(25^\circ C) \cdot (1 + \alpha T \cdot (T_j - 25^\circ C)) \quad (1)$$

Im „Standby-Fall“, in dem abgesehen vom Leckstrom von 1 μA , nahezu kein Strom durch die TVS-Diode fließt, entspricht die Sperrschichttemperatur (T_j) nahezu der Umgebungstemperatur. Unter der Annahme eines Temperaturkoeffizienten αT für diesen TVS-Typ von $9,9 \times 10^{-4} 1/^\circ C$, ergibt dies eine maximale V_{CLAMP} von 49,84 V bei 55 °C. Dieser Wert ist nun der Ausgangspunkt für die Dimensionierung der zweiten Stufe des Immunitätsfilters.

2.3 Zweite Störfestigkeitsfilterstufe

Die Frage ist nun, wie man die richtige Filterdämpfung und die besten Werte für die Filterkomponenten Werte erhält. Ausgehend von der Dämpfung kann die minimale Filterdämpfung mit Gleichung (2) berechnet werden.

$$G = 20 \cdot \log\left(\frac{V_{PM_MAX}}{V_{CLAMP_MAX}}\right) \quad (2)$$

$$G = 20 \cdot \log\left(\frac{44 V}{49,84 V}\right) = - 1,08 \text{ dB}$$

Anstelle des Symbols A (Abschwächung) wird das Symbol G (Verstärkung) verwendet. Eine negative Verstärkung bedeutet eine Abschwächung.

Gleichung (2) berücksichtigt den resultierenden Klemmspannungpegel V_{CLAMP_MAX} der TVS-Diode während des Überspannungsereignisses und den maximalen Betriebsspannungspegel V_{PM_MAX} des gewählten Wandlers. Die Aufgabe besteht darin, den Filter gemäß Abbildung 3 zu entwerfen, wobei eine LC-Filterschaltung zur TVS-Diode hinzugefügt werden muss.

APPLICATION NOTE

ANS023 | Transientenschutz SIP-3

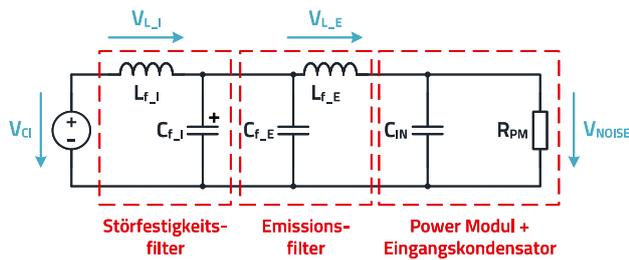


Abbildung 3: Ersatzschaltung für die Berechnung des Störfestigkeitsfilters der zweiten Stufe.

Der Hardwareentwickler kann unter Berücksichtigung der Berechnung eines entsprechenden Filterkondensators den Wert der Induktivität auswählen. Der Grund dafür ist, dass die Filterinduktivität in Reihe mit der Anwendung liegt und daher ihr Widerstand (R_{DC}) unerwünschte Verluste verursacht.

Daher sollte die Induktivität mit dem kleinstmöglichen R_{DC} -Wert in Bezug auf den maximalen Nennausgangsstrom des DC/DC-Wandlers gewählt werden. Für dieses Beispiel-Filterdesign wurde eine WE-PD2 (744776112) mit einer Induktivität von 12 μH , einem R_{DC} von 336 $\text{m}\Omega$ und einem Nennstrom von 2,72 A ausgewählt. Der DC-Eingangswiderstand des Leistungsmoduls kann mit der gegebenen Eingangs- und Ausgangsspannung, dem Ausgangsstrom sowie dem Wirkungsgrad im Betrieb bestimmt werden. Setzt man diese Parameter zusammen, lässt sich Gleichung (3) für den Eingangswiderstand des Wandlers aufstellen.

$$R_{PM} = \frac{V_{IN}^2}{\frac{V_{OUT} \cdot I_{OUT}}{\eta}} = \frac{V_{IN}^2}{P_{IN}} \quad (3)$$

$$R_{PM} = \frac{(24 \text{ V})^2}{\frac{5 \text{ V} \cdot 1 \text{ A}}{0,88}} = 101 \Omega$$

Abbildung 3 zeigt das Ersatzschaltbild, in dem die TVS-Diode als vereinfachte Spannungsquelle dargestellt wird. Der verbleibende Teil des Schaltplans für das EMV-Modell besteht aus zwei LC-Filtern für Störfestigkeit (Überspannungsschutz) und Emission (EMI-Dämpfung), dem Eingangskondensator des DC/DC Wandlers und dem Eingangswiderstand des Reglers.

Da es sich um eine Innenraumanwendung handelt und somit ein indirekter Surge auftritt, der durch die Überspannung verursacht wird, basieren die folgenden Annahmen und Berechnungen auf einem 8/20- μs -Impuls, wie er in der Norm IEC 61000-4-5 definiert ist.

Zur weiteren Vereinfachung können C_{f_E} und L_{f_E} weggelassen werden, da dieser Filter für die Unterdrückung von Störungen bei der Schaltfrequenz des Powermoduls ausgelegt ist (Abbildung 4).

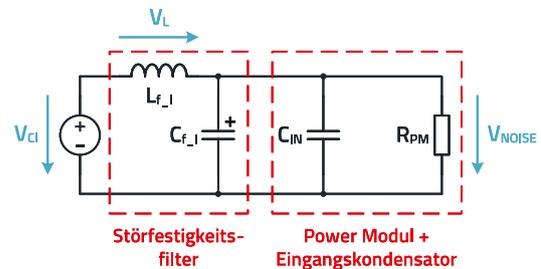


Abbildung 4: Vereinfachtes Ersatzschaltbild für die Berechnung des Störfestigkeitsfilters der zweiten Stufe.

Das Power Modul schaltet typischerweise mit 520 kHz. Die Überspannung wird hier auf 1 kHz bezogen. Betrachtet man das Frequenzspektrum des Stoßimpulses, so kann man feststellen, dass der höchste Wert der Störspannung bei einer Frequenz von $f = 1 \text{ kHz}$ auftritt.

Um die Dämpfung G des Filters zu erhalten, ist es notwendig die Ausgangsspannung mit der Eingangsspannung des Systems zu vergleichen (Gleichung (4)).

$$\frac{V_{NOISE}}{V_{CI}} = \frac{1}{Z_{L_f} + \left(\frac{1}{Y_{C_f} + Y_{C_{IN}} + Y_{R_{PM}}} \right)} \quad (4)$$

$$G = 20 \cdot \log \left(\left| \frac{V_{NOISE}}{V_{CI}} \right| \right)$$

$$G_{IMMUNITY_FILTER} = 20 \cdot$$

$$\log \left(\left| 1 - \omega^2 L_f (C_f + C_{IN}) + j\omega \frac{L_f}{R_{PM}} \right| \right)$$

Mit dem zuvor berechneten DC-Eingangswiderstand R_{PM} des Wandlers kann Gleichung (5) verwendet werden, um den erforderlichen Kondensatorwert zu ermitteln:

$$C_f = \frac{1 - \left(10^{\frac{G}{20}} - \left(\omega \cdot \frac{L_f}{R_{PM}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}}{\omega^2 \cdot L_f - (C_{IN} + C_{f_EMISSION})} \quad (5)$$

APPLICATION NOTE

ANS023 | Transientenschutz SIP-3

Dabei steht L_f für die Induktivität des Störfestigkeitsfilters, R_{PM} dem DC-Eingangswiderstand des Wandlers, C_{IN} dem Eingangskondensator und $C_{f_EMISSION}$ dem EMI-Filterkondensator einer Eingangs-PI-Filterstruktur. Die Werte finden Sie im Datenblatt des Powermoduls [173010535](#).

Unter der Annahme, dass eine 12 μ H-Induktivität verwendet wird, beträgt das Berechnungsergebnis für den Filterkondensator $C_f = 218 \mu$ F.

Nach Prüfung der Standardwerte für Kondensatoren wird ein Wert von 220 μ F ([860010775018](#)) gewählt, da er größer ist als der berechnete Wert. Ein Wert, der kleiner ist als die berechnete Kapazität würde keine ausreichende Dämpfung des Filters bieten. Die endgültigen Komponenten des Filters sind wie folgt ausgewählt: TVS Diode = [824550301](#), $L_{f_I} =$ [744776112](#), $C_{f_I} =$ [860010775018](#).

Der Einfluss der Temperatur auf die V_{CLAMP_MAX} und damit auf den Wert des Filterkondensators, ist in Tabelle 1 gezeigt.

Umgebungstemperatur	V_{CLAMP_MAX}	Filter Kapazität
25°C	48,4 V	178 μ F
55°C	49,84 V	218 μ F

Tabelle 1: Überblick über den Temperatureinfluss.

Die Kondensatorwerte wurden berechnet, jedoch unterliegen reale Kondensatoren relativ hohen Toleranzen. Der tatsächliche Kapazitätswert kann um bis zu $\pm 20\%$ variieren.

Wenn die Temperaturabhängigkeit von V_{CLAMP_MAX} nicht vollständig berücksichtigt wird, kann ein Kondensator mit einem zu niedrigen Kapazitätswert gewählt werden.

2.4 Transientenschutz und EMV

Um einen effizienten Filter zur Begrenzung transienter Überspannungen zu entwickeln, müssen viele Einflussparameter berücksichtigt werden. Dies ist besonders für eine Applikation im industriellen Umfeld wichtig, da hier aufgrund der umfangreichen elektrischen Infrastruktur häufig transiente Überspannungen auftreten. Der Filter mit Transientenschutz ermöglicht einen effizienten Schutz des betrachteten DC/DC-Power Moduls und gleichzeitig eine Dämpfung der hochfrequenten Emissionen.

Abbildung 5 zeigt das komplette EMV-Konzept für den Störfestigkeits- und Emissionsfilter. Die Werte für die verwendeten Komponenten sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Ref. Des.	Beschreibung	Anzahl.	Artikel Nr.
D	WE-TVSP Power TVS Diode $V_{DC} = 30 \text{ V}$, $V_{BR} = 35,05 \text{ V}$ $I_{PEAK} = 62 \text{ A}$, $V_{CLAMP} = 48,4 \text{ V}$	1	824550301
L_{f_I}	WE-PD2 SMT Power Inductor 12 μ H, $I_R = 2.72 \text{ A}$, $I_{SAT} = 3.15 \text{ A}$	1	744776112
C_{f_I}	WCAP-ATG8 Aluminum Electrolytic Capacitors THT Radial; 220 μ F/63 V	1	860010775018
C_{f_E}	WCAP-CSGP General Purpose MLCC 4,7 μ F/50 V X5R, 1210	2	885012209048
L_{f_E}	WE-PD2 SMT Power Inductor 4,7 μ H, PD2 family, $I_{SAT} = 2,46 \text{ A}$, $I_R = 1,82 \text{ A}$	1	744773047

Tabelle 2: BOM für Immunitäts- und Emissionsfilter.

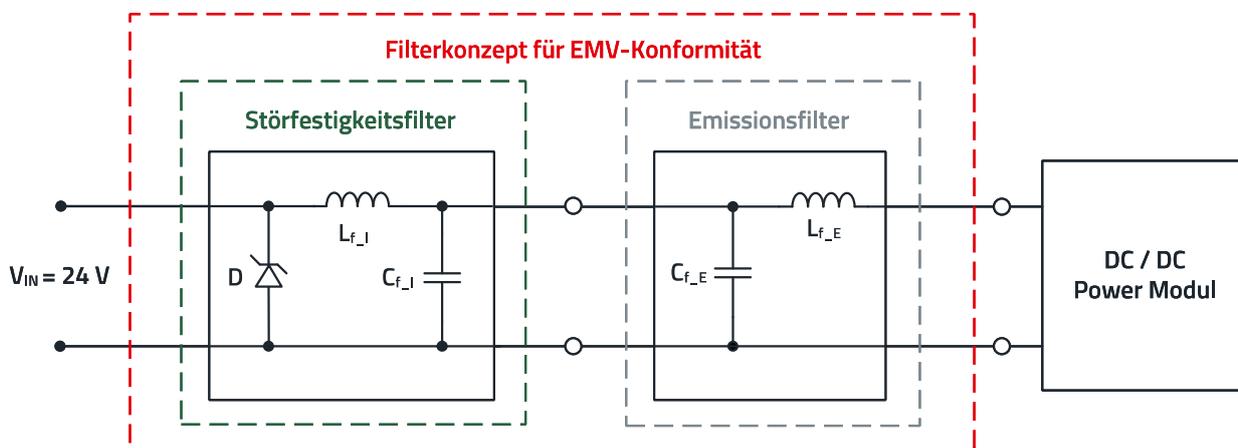


Abbildung 5: EMV-gerechtes Filterkonzept von Magi³C-Powermodulen mit Störfestigkeit und Emissionsfilter.

APPLICATION NOTE

ANS023 | Transientenschutz SIP-3

A. Anhang

A.1 Literatur

- [1] Würth Elektronik Datenblätter für SIP-3 Power Module:
<https://www.we-online.com/MAGIC-FDSM>
- [2] Würth Elektronik Datenblätter für TVS Dioden:
<https://www.we-online.com/WE-TVSP>

APPLICATION NOTE

ANS023 | Transientenschutz SIP-3

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

ANS023 | Transientenschutz SIP-3

Dokument Version	Veröffentlichungsdatum	Änderungen
ANS023a	2025/04/30	Ursprüngliche Version der Application Note