

APPLICATION NOTE

ANP024 | Das USB-Interface aus EMV-Sicht



Dr.-Ing. Heinz Zenkner

1. TECHNOLOGIEN UND KENNZAHLEN

Die USB (Universal Serial Bus) Spezifikation definiert die mechanischen, elektrischen sowie den Protokoll Layer des Interfaces. Kabel und Steckverbinder sind genau definiert. USB definiert 2 Arten von Hardware, Hubs und Funktionen bzw.

Endgeräte. Bis zu 127 Geräte könnten theoretisch zusammengeschaltet werden, in einer Sternbus Topologie, die Begrenzung ist hier nur die 7-bit Adresse. Verbindungen sind zwischen Hub und Funktion bzw. Endgerät oder zwischen Hub und Hub möglich, wobei Verbindungen zwischen Endgeräten direkt nicht möglich sind.

Der USB ist ein differentieller, bidirektionaler, serieller Kabelbus. Das differentielle NRZI-Signal wird asynchron zwischen den Ports übertragen. Die maximale Kabellänge beträgt 4 Meter, das Kabel beinhaltet 4 Adern, 2 für das verdrehte Datenpaar und 2 für die Versorgungsspannung der Endgeräte und die Masse.

Die Datenrate beträgt zwischen 10 kb/sek bis zu 480 Mb/sek in einem der 3 möglichen Datenratenmodi.

- 10 - 100 kb/sek für langsame Datenübertragung (Maus, Tastatur). Die Signalspannung beträgt 0 V bis 0,3 V.
- 0,5 - 10 Mb/sek für mittlere Datenübertragungsrate. Die Signalspannung ist hier 0,3 V (low) bis 2,8 V (high).
- 25 - 480 Mb/sek für hohe Datenübertragungsrate, definiert als USB 2.0 mit einer maximal möglichen Rate von 480 Mb/sek. Die Signalspannung ist hier $0\text{ V} \pm 10\text{ mV}$ (low) bis $400\text{ mV} + / - 10\%$ (high)

Bei hohen Datenübertragungsraten ist es erforderlich die symmetrischen Leitungspärchen mit einem $45\ \Omega$ Abschlusswiderstand jeweils nach Masse abzuschließen. Die Kabelimpedanz muss hier $90\ \Omega + / - 15\%$ (symmetrisch / differential) betragen.

Ursprünglich sollte USB die serielle und die parallele Schnittstellen im IT Bereich ersetzen, mittlerweile hat sich USB nicht nur im IT Bereich etabliert, sondern ist in vielen anderen Anwendungsbereichen nicht mehr wegzudenken, z.B.

- Heimaudio, Video – für digitale Fotos und Musik
- Automotive – für MP3 Musik
- Mobile IT wie, Handscanner – Überspielen der Daten auf einen PC
- Industriesteuerungen – Software Upgrade, Daten Down- und Upload
- Medizinische Geräte – Software Upgrade, Daten Down- und Upload

Der USB ist ein Netzwerk, das eine sternförmige Topologie aufweist. Vom Host-Controller aus verzweigen sich alle anderen USB – Endgeräte. Ein USB-Endgerät repräsentiert den Bus-Abschluss, wo hingegen ein USB-Hub zu einem anderen Hub oder zu Endgeräten verzweigen kann. Jeder weitere USB-Hub kann einen Verzweigungspunkt repräsentieren, bis die maximale Anzahl an adressierbaren Geräten erreicht ist. Damit wird deutlich, welche komplexe Netzstruktur mit einem USB aufgebaut werden kann und damit wird weiterhin deutlich, dass dieser Struktur ein besonderes Augenmerk hinsichtlich EMV gewidmet werden muss. Es ist jetzt schon klar, dass USB-Geräte, die als alleinstehende Geräte, d.h. ohne Hub, ohne weitere Verzweigungen, schon EMV-Schwächen aufweisen und „gerade so“ ihre an sie gestellten Anforderungen schaffen, in einem komplexeren Aufbau ihre Anforderungen nicht mehr erfüllen werden können. Das äußert sich dann in Schreib-/Lese Fehlern bei Laufwerken, Drop-outs bei Kameras, Schreibverzögerungen bei Tastaturen, usw. Aber dazu später mehr.

APPLICATION NOTE

2. HARDWARE UND KOMPONENTEN

Buchse und Stecker können bei USB verschiedene Größen haben, je nach Einsatz in Kameras, Videogeräten, oder IT. Auch der USB Hub- und die Endgerätestecker unterscheiden sich in ihrer Form. Die Pinbelegung ist jedoch immer gleich und in Abbildung 1 dargestellt, die dazugehörige Pinbelegung in Tabelle 1.



Abbildung 1: Pinbelegung der USB-Schnittstelle, Buchse und Stecker Type A.

Pin	Signalname	Farbe
1	VBUS	rot
2	D-	weiß
3	D+	grün
4	GND	schwarz
Gehäuse	Schirm	Masse

Tabelle 1: Pinbelegung und Kabelassemblierung beim USB.

Das USB-Kabel sollte wie in Abbildung 2 dargestellt aufgebaut sein.

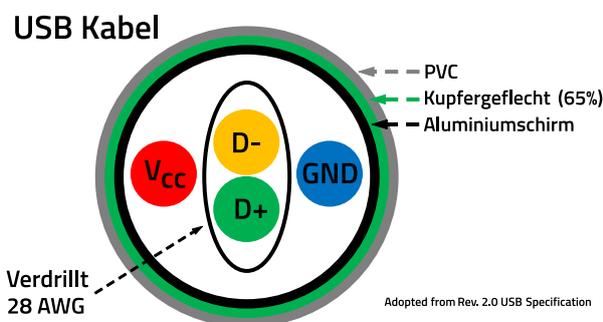


Abbildung 2: USB Kabel Layout.

Das Kabel hat 4 Adern, sogar die Adern sind genau definiert, die Datenadern sind 28 AWG (American Wire Gauge) und die Versorgungsadern 20 bis 28 AWG. Dadurch sind Durchmesser und Kupferwiderstand definiert, die HF-Leitungsparameter ergeben sich durch den weiteren Aufbau. Die zwei Versorgungsadern sind unverdrillt, die Datenadern sind

miteinander verdreht, dadurch ergibt sich die gegen Masse symmetrische Impedanz von 45 Ω , bzw. 90 Ω (+/- 15%) zwischen den Adern. Der Kabelschirm soll ein Schirmgeflecht mit mindestens 65% Flächenbedeckungsgrad sein und zusätzlich ein Aluminiumschirm haben, d.h. es ist eine doppelte Schirmung vorgesehen, um eine hohe Schirmdämpfung und einen gleichbleibenden Wellenwiderstand des Kabels zu garantieren. Aus der Praxis kann ich bestätigen, dass hier leider viele „Schwarze Schafe“ auf dem Markt kursieren, die zum Teil nur einen Aluschild haben und selbst der besteht aus einer Folie, die nur einseitig metallisiert ist. So aufgebaut, verleiht der „Schirm“ dem Kabel einen Spalt über seine gesamte Länge und die Schirmdämpfung erreicht somit anstatt der üblichen >50 dB kaum Werte über 15 dB – aber billig ist es.

Die Kabellänge darf 5 Meter nicht überschreiten, werden größere Längen benötigt, müssen Hubs zwischengeschaltet werden.

Bedingt durch die hohe Flexibilität in der Anwendung und durch die hohe Datenübertragungsrate ergeben sich – auch je nach Einsatzgebiet – besondere Anforderungen an das Schaltungsdesign und die Schnittstellenkonstruktion.

Chiphersteller wissen über die Problematik der hohen Datenrate und der trotzdem erforderlichen EMV-Anforderungen hinsichtlich Störemission und Immunität und entwickeln ihre USB-Controller diesbezüglich bestmöglich. Trotzdem muss nicht nur das Chipdesign sondern das ganze Schaltungsdesign hinsichtlich EMV entwickelt sein. Deshalb müssen

- Schaltungsdesign
- Layout
- Filterkonzept
- Konstruktion (Gehäuse, Stecker)

aufeinander abgestimmt werden. Das benötigt in der Entwicklungsphase sicherlich mehr Aufwand, der sich aber in höherer Qualität und auch in niedrigeren Produktkosten bemerkbar macht. Gutes Engineering verteuert Produkte nicht, sondern macht sie bei gleichbleibender Qualität billiger.

APPLICATION NOTE

ANP024 | Das USB-Interface aus EMV-Sicht

3. EMV KRITERIEN

Was hat nun EMV mit der USB-Schnittstelle zu tun? Bevor wir uns das genauer ansehen möchte ich eine Gleichung definierten:

$$\text{EMV} = \text{gesicherte Funktionalität} \quad (1)$$

EMV ist nicht „nice to have“ um gesetzliche Anforderungen für die Konformitätserklärung zu erfüllen. EMV in unserem Beispiel des USB bedeutet:

- niedrige Störstrahlung: Eine gut angepasste symmetrische Schnittstelle mit optimierten Filtern strahlt nicht. Das Nutzsignal hat durch die Anpassung die erforderliche Güte, damit erreichen wir auch den erforderlichen Signal-/Störabstand und eine höhere Störfestigkeit.
- Hohe Störfestigkeit: Durch die Symmetrisierung des Nutzsignals über zusätzliche Filter mit Überspannungsschutz und Einsatz von Schnittstellenbuchsen hoher Schirmdämpfung – mit entsprechendem konstruktiv hochwertigem (nicht teurem) Gehäusedesign wird die Störfestigkeit gegen Transiente und andere induktiv und kapazitiv einkoppelnden Störsignale entscheidend erhöht und damit die Funktionalität gewährleistet.

Bevor wir uns mit den Schaltungs- und Konstruktionsmaßnahmen beschäftigen, kurz ein kleiner Ausflug in die EMV-Grundlagen. Was ist EMV? Elektromagnetische Verträglichkeit ist die Fähigkeit, eines elektrischen Systems oder Gerätes in seiner elektromagnetischen Umgebung bestimmungsgemäß zu arbeiten, ohne durch benachbarte andere Systeme oder Geräte, in dem bestimmungsgemäßen Betrieb gestört zu werden und ohne andere Systeme oder Geräte bei ihrem bestimmungsgemäßen Betrieb zu stören. Das ist ein langer und komplizierter Satz, beinhaltet aber genau das, was wir vorher schon etwas technischer unter der Frage „Was bedeutet EMV im Falle der USB-Schnittstelle“ beschrieben hatten.

Welche EMV-Phänomene müssen wir bei der Entwicklung eines Produktes mit USB berücksichtigen, bzw. was sind die kritischsten? Es sind:

- Störemission (Störfeldstärke)
- Störfestigkeit gegen Elektrostatische Entladung (ESD)
- Störfestigkeit gegen schnelle Transiente (Burst)

Wie erwähnt, gibt es inzwischen zahlreiche Anwendungsgebiete für den USB. Jedes Anwendungsgebiet hat andere normative EMV-Anforderungen, aber denken wir an unsere Gleichung (1).

Die Funktionalität muss immer sichergestellt werden und die Erfahrung zeigt: Passt es mit der Funktionalität, dann passt auch die EMV, egal in welchem Anwendungsgebiet. Wir werden im Folgenden Schritt für Schritt auf das USB-Schaltungsdesign eingehen, und die zu beachtenden Designpunkte darstellen.

4. EMV SCHALTUNGSKONZEPTE

Die USB-Schnittstelle ist eine bidirektionale, symmetrische Schnittstelle wie in Abbildung 3 dargestellt.

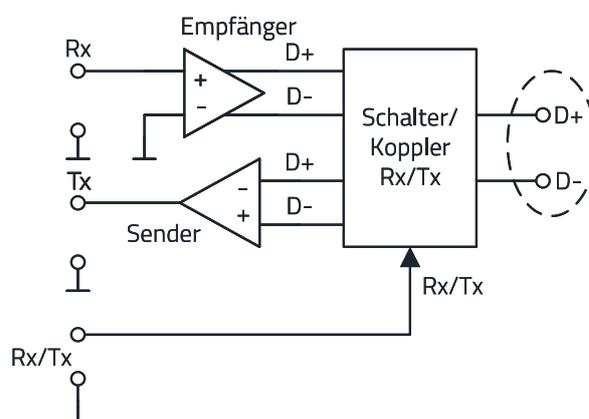


Abbildung 3: Das USB-Interface ist symmetrisch und bidirektional.

Symmetrische Übertragungsverfahren haben zahlreiche Vorteile hinsichtlich Signalintegrität, was sich in geringer Störemission und hoher Störfestigkeit zeigt. Zur näheren Erläuterung dient Abbildung 4.

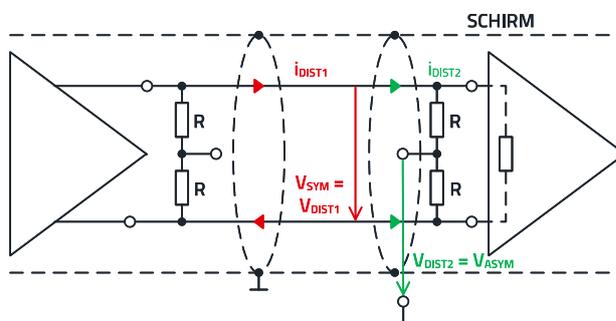


Abbildung 4: Die symmetrische Schnittstelle mit ihren messbaren Störpotentials.

APPLICATION NOTE

ANP024 | Das USB-Interface aus EMV-Sicht

Messbar sind:

- U_{sym} : Störspannung zwischen den Signaladern
- U_{Asym} : Störspannung zwischen der Potentialmitte und dem Referenzpotential – der Masse bzw. dem Kabelschirm.

Das bedeutet, die USB-Übertragungsstrecke kann sowohl mit symmetrischen, als auch mit asymmetrischen Störpotentialen behaftet sein. Das können sowohl Störpotentiale von der Schnittstelle selbst sein, in diesem Falle sprechen wir von Störabstrahlung oder Störemission, oder das kann eine elektromagnetische Einwirkung von außen in Form von induktiver, kapazitiver oder Wellenkopplung sein, in diesem Falle sprechen wir von Störeinkopplung, was eine gewisse Störimmunität der Schnittstelle voraussetzt, um eine weitere Funktion aufrecht zu erhalten.

4.1 Störemission

Symmetrische Störungen werden im Falle der USB-Übertragung hauptsächlich von nicht linearen Signalharmonischen auf Grund von Fehlanpassung und mangelhaften Schaltungsdesign erzeugt. Diese Störungen können bei Asymmetrie der Übertragungsstrecke, d.h. Sender, Leiterplatte mit Leiterbahnen, ggf. Filter, Kabel, bis hin zum Empfänger zu Störabstrahlungen führen und beeinträchtigen die Signalqualität.

Asymmetrische Störungen entstehen wegen parasitärer Kopplungen im Schaltungsumfeld des USB-Controllers, die meist durch kapazitive Kopplung mit höher werdender Störfrequenz auch zunehmend in der Amplitude auf dem USB-Signal gefunden werden können. Jedoch sind diese Störungen auf beiden USB – Adern in Phase und Amplitude gleich zu finden und beeinträchtigen somit nicht das Nutzsignal. Unsymmetrien im Kabel oder am Empfänger konvertieren jedoch häufig das ursprünglich asymmetrische Störsignal zu einem symmetrischen, das dann zur Signalbeeinträchtigung beitragen kann. Hier ist also wieder hochwertiges Schaltungsdesign gefragt. Abbildung 5 verdeutlicht den Fall.

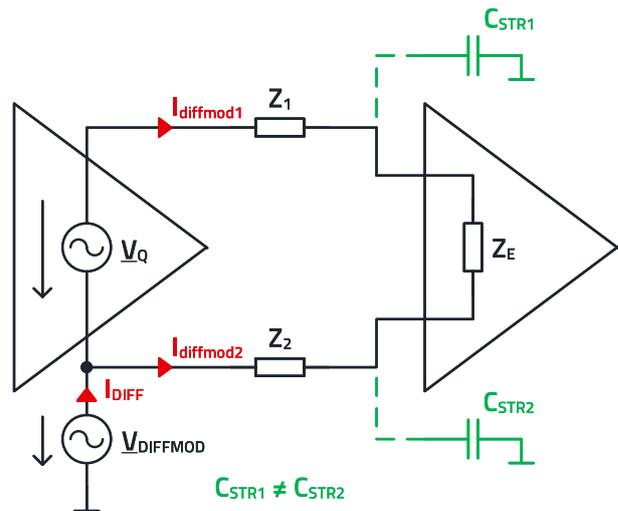


Abbildung 5: Konvertierung von symmetrischen zu asymmetrischen Störungen aufgrund von parasitären Koppelkapazitäten.

4.2 Störfestigkeit

Für den Fall der Einwirkung von Störungen auf den USB bietet die symmetrische Datenübertragung einen wesentlichen Vorteil gegenüber der einfachen Koaxialleitung. In Abbildung 6 ist die Störeinkopplung auf eine Koaxialleitung dargestellt.

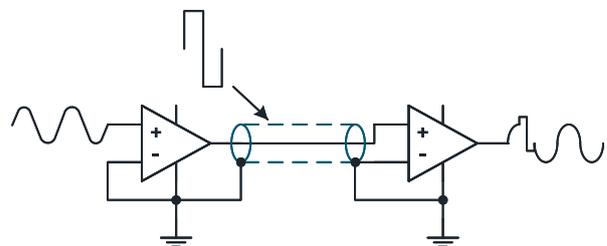


Abbildung 6: Einwirkung einer Störung auf eine koaxiale Datenübertragungsstrecke.

Ein Burst (elektrisches Feld) beispielsweise, abgestrahlt von einer der USB-Leitung parallelen Netzleitung wird je nach Schirmungseffektivität der koaxialen Leitung in die Datenleitung einkoppeln und das Datensignal stören. Das führt je nach Störsignallänge und Amplitude zu Daten- bzw. Kommunikationsfehlern.

APPLICATION NOTE

ANP024 | Das USB-Interface aus EMV-Sicht

Abbildung 7 stellt den Fall der symmetrischen Datenübertragung dar, hier vorerst mit einem lediglich verdrehten Aderpaar.

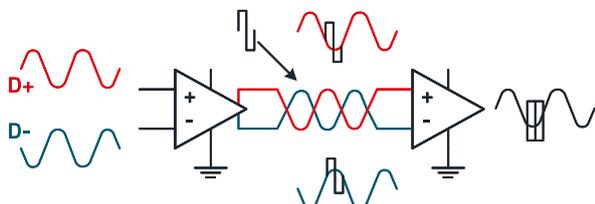


Abbildung 7: Kompensation von elektrischer Störeinkopplung am symmetrischen Signaleingang und verdrehten Aderpaaren.

Das Nutzsignal ist von einer Ader zur anderen um 180° in der Polarität verdreht, am Eingang des Empfängers wird die Signaldifferenz ausgewertet. Das Störsignal jedoch wirkt auf beide Adern gleichphasig, sodass es sich am Empfänger nicht als Störsignal auswirken kann.

Des Weiteren wird durch die Verdrehung der Adern im Falle der induktiven Störeinkopplung (Magnetfeld) eine Kompensation der Störeinkopplung erreicht. Durch die Symmetrisierung der Teilinduktivitäten der jeweiligen Verdrehung kompensieren sich die Störbeeinflussungen gegeneinander.

4.3 Möglichkeiten der Reduktion von Emission und Erhöhung der Störfestigkeit

Die Praxis zeigt, dass leider sowohl die Störemission nicht verhindert werden kann, als auch die Störfestigkeit ihre – manchmal sehr niedrige Grenze hat. Die Ursache liegt in vielen Details, von denen sind die wichtigsten:

- Die Aus-/ Eingänge des USB-Controllers sind nicht genügend symmetrisch, das USB-Signal weist asymmetrische Störungen auf.
- Das Layout ist nicht HF / EMV-gerecht, parasitäre Kapazitäten und fehlende Wellenwiderstands-Anpassung erzeugen asymmetrische Störungen.
- Das Schaltungsdesign (USB-Filter) ist mangelhaft, die Filter beeinflussen die Signalqualität und / oder die Einfügungsdämpfung ist zu niedrig.
- Die Schnittstellenkonstruktion (Buchse, Gehäuse) ist mangelhaft, schlechte Masse reduziert die Schirmdämpfung des Kabels, Filter haben schlechten Massebezug.
- Das USB-Kabel ist unsymmetrisch, schlecht geschirmt, hat einen mangelhaften Masseanschluss. Das Kabel verschlechtert die Signalqualität, strahlt

Signalharmonische ab und weist ungenügende Schirmdämpfung gegenüber Fremdstörungen auf.

Einige Punkte können nicht beeinflusst werden, dazu gehören die technische Realisierung des USB-Controllers, und die Verwendung von „billigen“ USB-Kabel. Das zeigt schon, dass Präventivmaßnahmen getroffen werden müssen. Maßnahmen um

- die Schnittstelle vor Einwirkung von Fremdstörungen zu schützen, die zur Zerstörung des USB-Controllers führen können.
- Störabstrahlung von Signalen über das Kabel zu begrenzen.

5. REALISIERUNG DES USB-FILTERS

5.1 Schaltungstechnik

Beide Punkte können über zusätzliche Filter an den USB-Schnittstellen erfüllt werden. Abbildung 8 zeigt die Grundschialtung eines symmetrischen USB-Signalfilters.

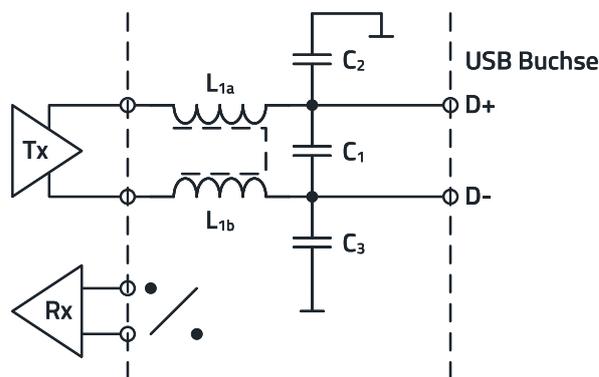


Abbildung 8: Grundschialtung eines symmetrischen Signalfilters.

Kapazitäten bis ca. 3 pF zwischen Datenleitung und Masse sind bei USB 2.0 tolerabel, darüber hinaus wird das Signal zu stark beeinträchtigt, sodass nichtlineare Verzerrungen auftreten, die Phasenverschiebung und Dämpfung im Oberwellenanteil des Nutzsignals verursachen. Die Kondensatoren C_2 und C_3 reduzieren mit der stromkompensierten Drossel die symmetrischen Störanteile. Auf das Signal wirkt die Kapazität $C_2 / 2$ bzw. $C_3 / 2$. Es versteht sich von selbst $C_2 = C_3$, C_1 reduziert die symmetrischen Störanteile und wirkt somit auch auf das Nutzsignal, seine Kapazität sollte kleiner 4 pF sein. Die Werte hängen auch stark von den Eigenschaften der stromkompensierten Drossel ab.

APPLICATION NOTE

ANP024 | Das USB-Interface aus EMV-Sicht

Die Drossel muss eine hohe Symmetrie bei kleiner Streukapazität zwischen L_{1a} und L_{1b} aufweisen. Des Weiteren muss der Realteil der Ferritpermeabilität – das ist der induktive Anteil klein sein und im Nutzfrequenzbereich liegen. Dagegen muss der resistive Anteil der Permeabilität – das ist der komplexe Anteil groß sein und im zu filternden Frequenzbereich liegen. Abbildung 9 verdeutlicht die Zusammenhänge. Das Ferritmaterial hat seinen Übergangsbereich bei etwa 200 MHz.

$$\underline{\mu} = \mu' - j\mu'' \quad (2)$$

$$\underline{Z} = j\omega L_0 \cdot (\mu' - j\mu'') = R + jX \quad (3)$$

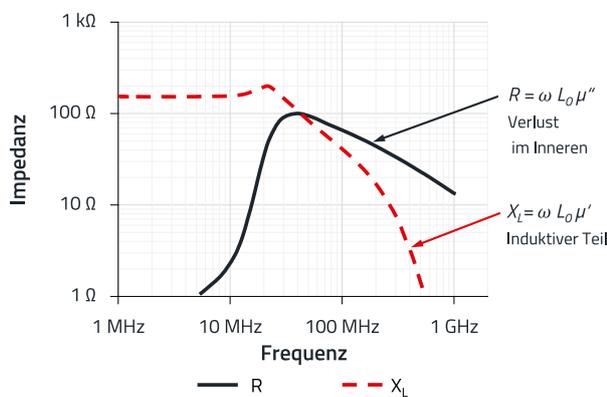


Abbildung 9: Beispiel für den Verlauf der komplexen und realen Permeabilitätsanteile eines „HF“ – Ferritmaterials.

Transiente Störsignale, wie ESD und Bursts können grundsätzlich mit Varistoren und Dioden begrenzt werden. Besonders SMT Multilayer-Varistoren sind besonders schnell und vertragen viel Energie. Allem gemeinsam ist jedoch die hohe Kapazität, deshalb sind sie für eine Begrenzung von Transienten am USB nicht geeignet. Eine Transientenbegrenzung mit Dioden ist in Abbildung 10 dargestellt.

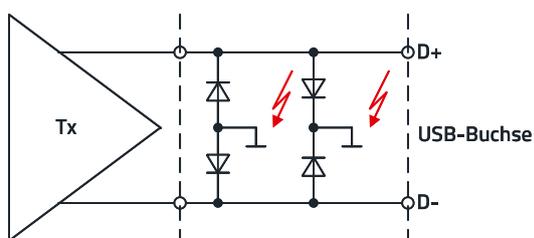


Abbildung 10: Diodenbegrenzer zur Reduktion von gekoppelten Transienten (Burst, ESD) auf die USB – Schnittstelle.

Sowohl Transiente auf D+ als auch auf D- werden gegen Masse auf die Durchlassspannung V_F der Dioden begrenzt. Diese Spannung liegt bei Siliziumdioden bei etwa 0,7 V. Es zeigt sich hier sehr schnell ein Problem, deshalb ist das rechte Diodenpaar mit 2 roten Blitzern versehen: Die Signalspannung des „Mid-speed“ – Signals beträgt bis 2,8 V (D+ zu D-), also 1,4 V zu Masse. Der positive Zweig muss also mit einem „offset“ versehen werden, um die höheren Signalspannungen nicht zu beeinträchtigen.

Abbildung 11 zeigt die Lösung.

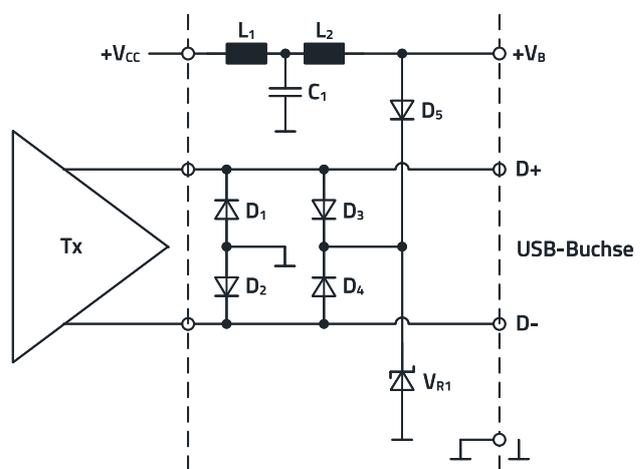


Abbildung 11: Diodenbegrenzer zur Reduktion von gekoppelten Transienten (Burst, ESD) auf die USB – Schnittstelle mit „offset“ für höhere Signalpegel.

Eine zusätzliche TVS-Diode mit einer Begrenzungsspannung von 6 V setzt den Schwellwert auf ca. 6,7 V. Das ist für den Schutz ausreichend, TVS-Dioden kleinerer Begrenzungsspannung sind zu langsam um ESD zu begrenzen. Die Pegelbilanz ist in Abbildung 12 verdeutlicht.

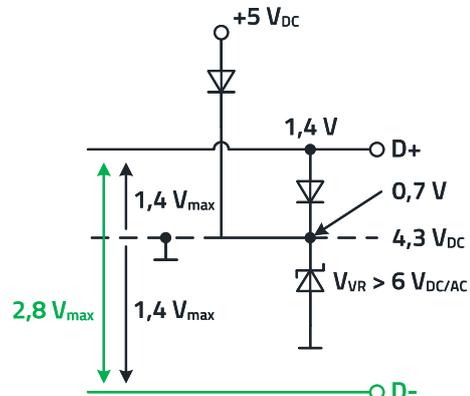


Abbildung 12: Pegelbilanz der positiven Diodenstrecke.

APPLICATION NOTE

ANP024 | Das USB-Interface aus EMV-Sicht

Über die zusätzliche Diode D_5 in Abbildung 10 kann gleichzeitig eine Transientenbegrenzung am Anschluss der Versorgungsspannung erreicht werden. Die Kapazität der TVS-Diode ist mit 5 pF zwar klein, wäre für USB jedoch schon zu groß. Da V_{R1} jedoch in Reihe mit D_3 bzw. D_4 liegt, bewirkt die Kapazität von V_{R1} hier eine Verringerung der Gesamtkapazität, die das Signal beeinflusst – ist also unkritisch, da D_3 und D_4 Kapazitäten von ca. 2 pF haben. D_3 und D_4 liegen wie in Abbildung 8 die Kondensatoren bezüglich des Signals in Reihe, somit ergibt sich eine gesamte kapazitive Belastung von Signal zu Signal von 2 pF und Signal gegen Masse mit etwa 3 pF.

Im Versorgungsspannungszweig ist ein T-Filter mit 2 SMT-Ferriten und einem keramischen Kondensator. Der verlustbehaftete Anteil der Permeabilität sollte bei etwa 30 MHz deutlich ansteigen, der Induktive Anteil ist unkritisch, da keine Signale beeinflusst werden. Ein wichtiger Parameter ist die Stromtragfähigkeit, die in den Datenblättern bei 20 °C angegeben wird. Sie sollte natürlich ausreichend für die jeweilige Applikation gewählt werden.

5.2 Praxisbeispiel

Abbildung 13 zeigt das Gesamtschaltbild. Die dazugehörigen technischen Daten der Bauelemente sind folgend spezifiziert.

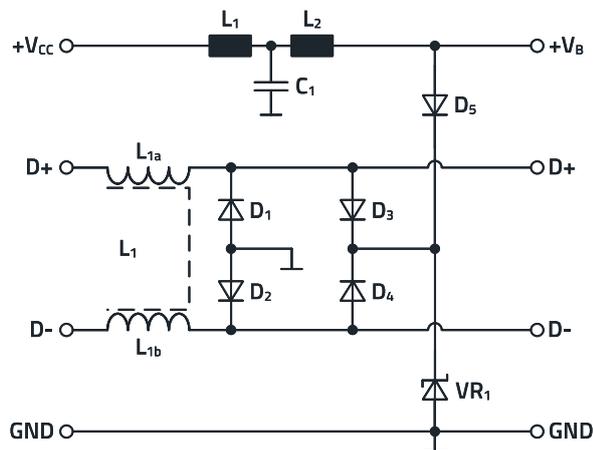


Abbildung 13: Gesamtschaltbild des USB 2.0 – Filters.

Filter für die DC-Versorgung

Der SMT-Ferrit hat bei 30 MHz bereits eine Impedanz von 300 Ω , davon 200 Ω resistiv – also „ohmscher“ Anteil. Im Bereich von ca. 80 MHz bis 500 MHz, in dem bei USB-Datenübertragung die höchsten Störungen zu erwarten sind, hat der Ferrit seine maximale Impedanz, ab 200 MHz praktisch nur verlustbehaftet. Ab 200 MHz wirkt der Ferrit wie ein ohmscher Widerstand ohne Blindanteile. Eine Übersicht über die wichtigsten Parameter zeigt Tabelle 2, in Abbildung 14 ist der Impedanzverlauf dargestellt.

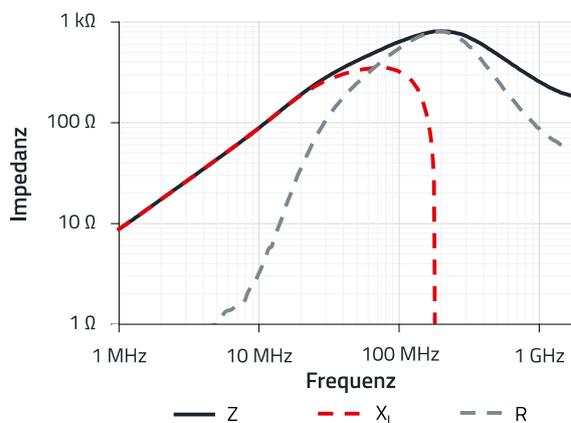


Abbildung 14: Impedanzverlauf des SMT-Ferrits 742792651.

Der hier verwendete Kondensator „0603X684K5RAC“ hat folgende Kenndaten:

- Max. Spannung: 16 V
- Kapazität: 680 nF
- Toleranz: 10%
- Keramik: X7R

Der Kondensator sollte seine serielle Resonanzfrequenz über 500 MHz haben, das hängt vom Dielektrikum und von der Bauform ab. Kleine Bauformen wie 0603 oder kleinere mit verlustbehaftetem Dielektrikum wie X7R oder YUV sind gut geeignet. Verlustbehaftete Dielektrika zeigen weniger ausgeprägte Resonanzen, was für Filter im Versorgungsspannungsbereich anzustreben ist. Die Resonanz ist eine Serienresonanz die den Kondensator durch die parasitären induktiven Anteile über der Resonanzfrequenz für das Filter unbrauchbar macht.

Eigenschaften	Testbedingungen		Wert	Einheit	Tol.
Impedanz @ 100 MHz	100 MHz	Z	600	Ω	$\pm 25\%$
Maximale Impedanz	200 MHz	Z	800	Ω	typ.
Nennstrom	$\Delta T = 40 K$	I_R	1000	mA	max.
DC-Widerstand		R_{DC}	0,20	Ω	max.

Tabelle 2: Elektrische Kenndaten des SMT-Ferrits 742792651.

APPLICATION NOTE

ANP024 | Das USB-Interface aus EMV-Sicht

D. h. schon vorab: Auch der Masseanschluss (Layout!) des Kondensators muss niederinduktiv sein, um die Gesamtimpedanz möglichst klein zu halten. Abbildung 15 verdeutlicht den Zusammenhang.

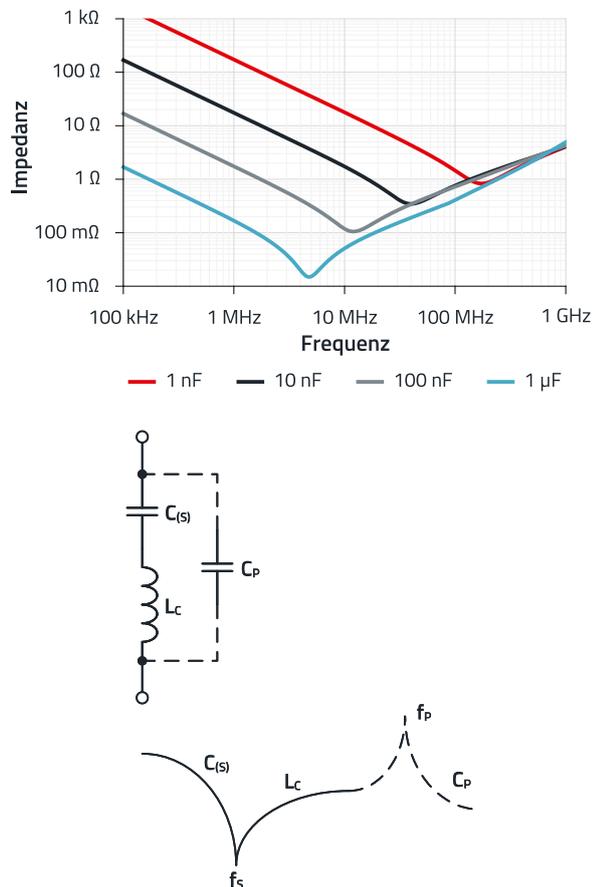


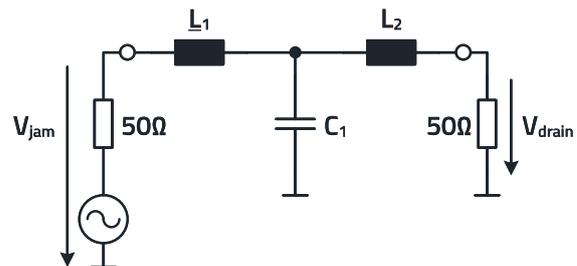
Abbildung 15: Der Kondensator mit seinen parasitären Eigenschaften (vereinfacht).

Je nach Bauform und Dielektrikum hat der Kondensator eine Serienresonanz, die bereits bei wenigen MHz auftreten kann. Darüber hinaus hat der Kondensator eine zweite Resonanz, die aber in der Frequenz wesentlich höher liegt. Typische SMT-Kondensatoren in der Bauform 0804 mit X7R Keramik haben bei 100 nF ihre Serienresonanz bei ca. 500 MHz und ihre parallele Resonanz bei 1,5 GHz.

Das so aufgebaute T-Filter für die Versorgungsspannung hat eine hohe Einfügungsdämpfung. Die T-Schaltung wurde deshalb gewählt, weil davon ausgegangen werden muss, dass sowohl Quelle als auch Senke im Stromversorgungsbereich niederimpedant sind.

So ergibt sich eine optimale Fehlanpassung und dadurch die maximale Dämpfung.

In Abbildung 16 ist die theoretisch mögliche Einfügungsdämpfung als Beispiel in einem 50 Ω System berechnet. Es ergibt sich eine maximale Dämpfung bei 100 MHz von 70 dB. Das sollte auch für die größten Härtefälle ausreichend sein.

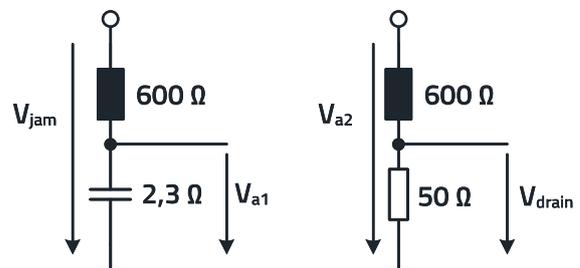


Annahme: source, drain = 50 Ω

$L_1, L_2: 600 \Omega @ 100 \text{ MHz}$

$$C_1: 680 \text{ nF} = \frac{1}{2\pi f \cdot 680 \cdot 10^{-12} \Omega} \quad (4)$$

@ 100 MHz → 2,3 Ω



$$a_1 = 20 \cdot \log\left(\frac{2,3}{600 + 2,3}\right) = 48 \text{ dB} \quad (5)$$

$$a_2 = 20 \cdot \log\left(\frac{50}{600 + 50}\right) = 22 \text{ dB} \quad (6)$$

$$a_{\text{ges}} = 48 \text{ dB} + 22 \text{ dB} = 70 \text{ dB} \quad (7)$$

Abbildung 16: Berechnung der Einfügungsdämpfung des T-Filters in der Versorgungsspannung.

APPLICATION NOTE

ANP024 | Das USB-Interface aus EMV-Sicht

Datenleitungsfilter

Das Herz des Datenleitungsfilters ist die Stromkompensierte Drossel [744232090](#). Die Drossel hat wegen ihrer Wicklungstechnik und der wenigen Windungen eine hohe Symmetrie und geringe parasitäre Kapazitäten. Wegen der hohen Permeabilität des Ferritmaterials kann eine hohe Einfügungsdämpfung erreicht werden. In Abbildung 17 ist der Aufbau dargestellt, Tabelle 3 zeigt die wichtigsten Parameter.

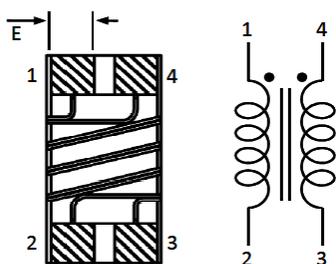


Abbildung 17: Stromkompensierte Drossel [744232090](#) für das Datenleitungsfilter.

In Abbildung 18 ist der Impedanzverlauf der Drossel im „Common Mode“ dargestellt.

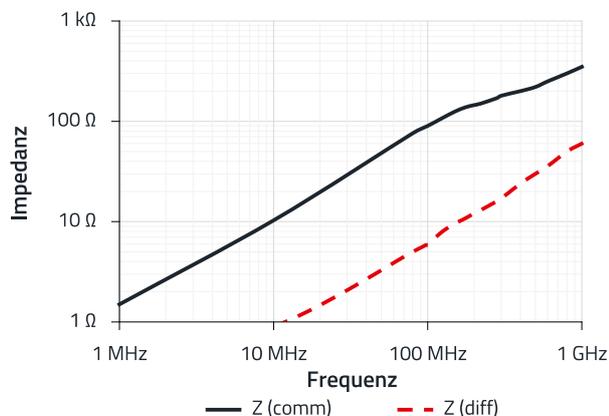


Abbildung 18: Impedanzverlauf der stromkompensierten Drossel [744232090](#).

Das ist ihre Gleichtakt- oder Asymmetrische Impedanz, die dann wirkt, wenn auf D+ und D- die gleichen Störanteile gegenüber Masse sind. Das ist bei kapazitiven oder induktiven Koppelungen auf die Schaltung oder dessen Leiterbahnen immer der Fall. Dieser Impedanzanteil muss also möglichst hoch sein. Bei 100 MHz hat die Drossel etwa 90 Ω. Die Differential Mode Impedanz ist die kompensierte Impedanz durch den Wicklungsaufbau. In einem Zweig „geht der Strom hin – im anderen wieder zurück“, so soll die Stromkompensation entstehen und diese Impedanz sieht das Nutzsignal. Diese Impedanz muss möglichst klein sein. Alle Anteile dieser Impedanz kommen aufgrund von Unsymmetrien im Aufbau und wegen Verlusten im Material durch Wirbelströme und Skin-Effekt zustande. Bei 100 MHz hat diese Drossel eine Impedanz von 6 Ω (beide Wicklungen zusammen).

Nun zu den Filterkondensatoren, die am Ausgang des Filters einen Tiefpass 2. Ordnung bilden. Anstelle von Kondensatoren wird hier ein Dioden-Array verwendet. Die integrierten Dioden besitzen auch eine Kapazität, eine parasitäre Kapazität, die wir uns hier zu Nutze machen. Zudem ist die parasitäre Induktivität der TVS-Dioden im Array sehr niedrig, das muss so sein, da sonst die kurze Reaktionszeit auf die Überspannungs-Transienten nicht erreicht werden kann. So kombinieren wir einen nahezu idealen Kondensator mit einem effektiven Transienten-Schutz.

Eigenschaften	Testbedingungen		Wert	Einheit	Tol.
Impedanz	100 MHz	Z	90	Ω	± 25%
Nennspannung		U _R	50	V	max.
Nennstrom	ΔT = 40 K	I _R	370	mA	max.
DC-Widerstand	@ 20 °C	R _{DC}	0,30	Ω	max.

Tabelle 3: Elektrische Kenndaten der Stromkompensierten Drossel [744232090](#).

APPLICATION NOTE

ANP024 | Das USB-Interface aus EMV-Sicht

Die wichtigsten elektrischen Kenndaten und der Aufbau des Arrays sind in Abbildung 19 und Tabelle 4 gegeben.

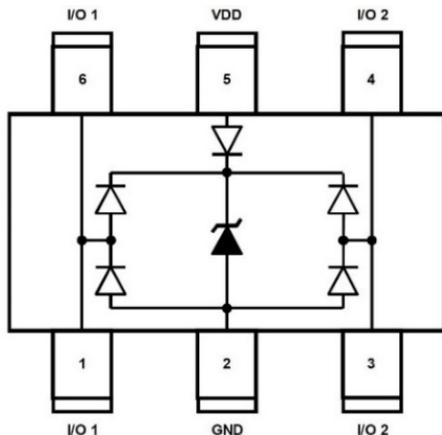


Abbildung 19: Aufbau des Diodenarrays WE-TVS [82400102](#).

Auch bei diesem Filter lässt sich die Störsignal-Dämpfung berechnen, davon ausgehend, dass die Störung auf beiden Signaladern in gleicher Amplitude und in gleichem Phasenwinkel auftritt, ergibt sich die Berechnung nach Abbildung 20 und Gleichung (8) - Gleichung (10).

$$C_x = 6,6 \text{ pF} \quad (8)$$

$$X_C = \frac{1}{j\omega C} = 240 \Omega @ 100 \text{ MHz} \quad (9)$$

$$a = 20 \cdot \log\left(\frac{100}{240 + 100}\right) = 10,6 \text{ dB} \quad (10)$$

Die Dämpfung beträgt hier 10 dB bei 100 MHz. Auch das ist genügend, da mit geringeren Störanteilen als auf dem Stromversorgungsanschluss gerechnet werden kann und das Nutzsignal nicht beeinflusst werden darf. Jede Kapazität zur Masse wirkt als halbe Kapazität als Signallast.

Eigenschaften	Testbedingungen	Wert typ.	Wert max.	Einheit
C_{I0}	$V_{Pin5} = 5 \text{ V}, V_{Pin2} = 0 \text{ V}, V_{I0} = 2,5 \text{ V}, f = 100 \text{ MHz}, I/O \text{ to GND}$	2,0	2,5	pF
C_x	$V_{Pin5} = 5 \text{ V}, V_{Pin2} = 0 \text{ V}, V_{I0} = 2,5 \text{ V}, f = 100 \text{ MHz}, I/O \text{ to GND}$	0,4	0,6	pF

Tabelle 4: Elektrische Kenndaten des Diodenarrays WE-TVS [82400102](#).

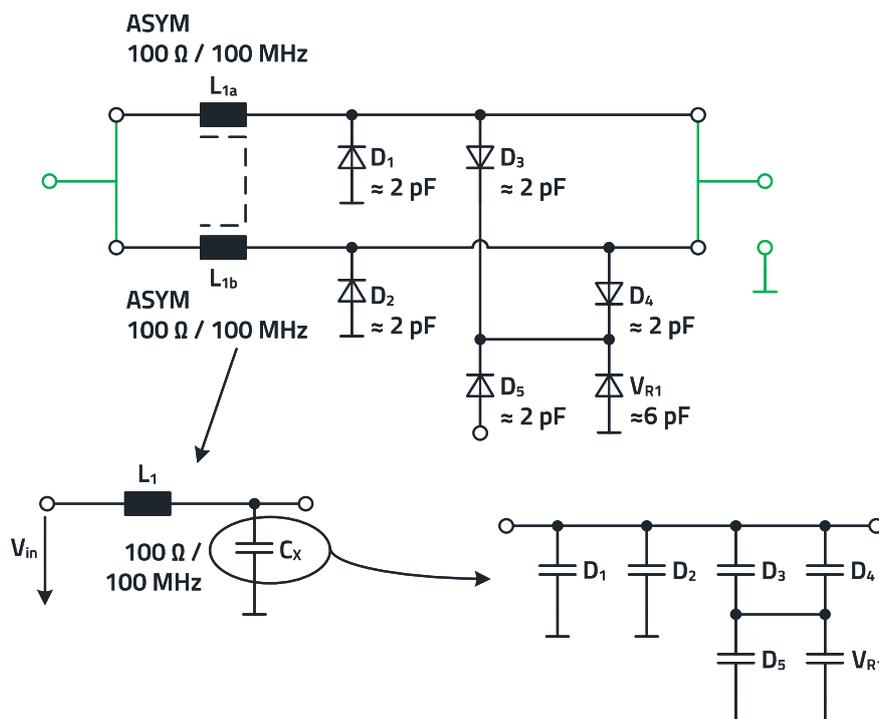


Abbildung 20: Einfügungsdämpfung des USB-Datenleitungsfilters.

APPLICATION NOTE

ANP024 | Das USB-Interface aus EMV-Sicht

Das Layout

Eine Leiterplatte mit den zugehörigen Leiterbahnen ist eine Anordnung von Bauelementen mit Kapazitäten und Induktivitäten. Somit muss das Layout den Schaltungsanforderungen entsprechend entwickelt werden. Ein simpler LC – Tiefpass kann durch ungünstiges Layout in seiner Wirksamkeit erheblich beeinträchtigt werden.

Was ist am Layout in Abbildung 21 falsch:

- Der Masseanschluss zum Kondensator ist zu lang. 1 cm Leiterbahn entspricht 6 - 10 nH.
- Der Masseanschluss sollte unmittelbar zum Gehäuse geleitet werden, da der Massebezug der Kabelschirmung und der Massebezug des Filters auf gleichem HF-Potential liegen müssen.
- Zwischen Induktivität und Kondensator ist eine Stichleitung zum Kondensator geführt. Diese Stichleitung ist eine zusätzliche Induktivität in Serie mit dem Kondensator und wird den Kondensator durch den mit zunehmender Frequenz höheren Blindwiderstand der Induktivität unwirksam werden lassen.
- Filtereingang und Filterausgang koppeln induktiv miteinander. Das Filter wird mit höher werdenden Frequenzen kurzgeschlossen.

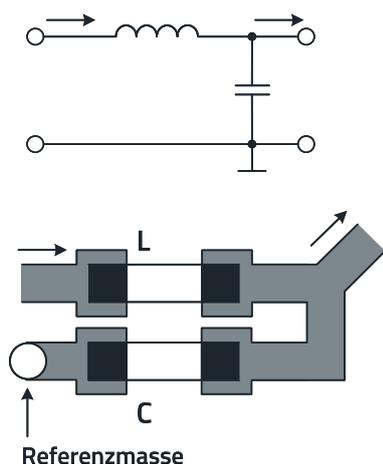


Abbildung 21: Beispiel eines Tiefpasses für hohe Frequenzen mit mangelhaftem Layout.

- Die Bauelemente koppeln kapazitiv, da sie parallel zueinander liegen. Auch hier wird die Koppelung mit steigender Frequenz größer.

In Abbildung 22 ist das korrigierte Layout mit der dazugehörigen HF – gerechten Anordnung der Bauelemente zu sehen.

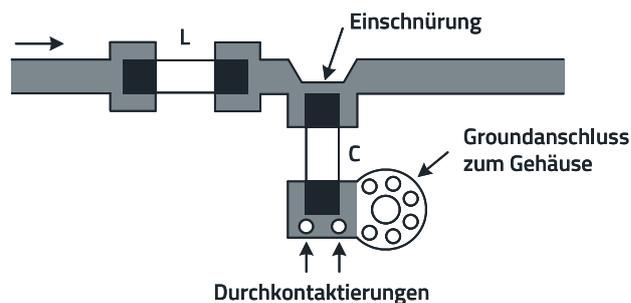
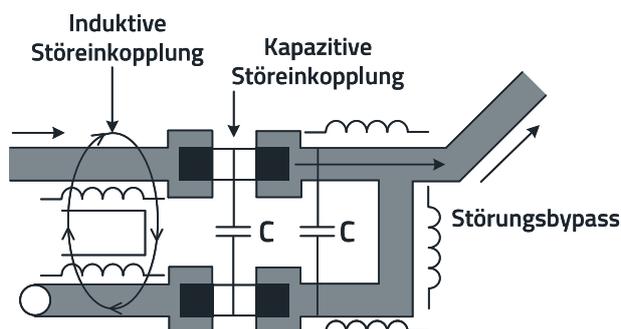


Abbildung 22: HF-Optimiertes Layout eines LC-Filters.

Was ist am Layout in Abbildung 22 richtig?

- Die Einschnürung verhindert, dass Störstrom am Kondensator vorbeigeleitet wird. Der Kondensator „liegt“ im Signalpfad.
- Die rechteckige Anordnung der Bauelemente verhindert gegenseitige Kopplung
- Der kurze und durch 2 Durchkontaktierungen realisierte niederimpedante Masseanschluss am Kondensator bietet einen optimalen HF-beruhigten Referenzpunkt für den Kondensator.

Fehlerhaft:



APPLICATION NOTE

ANP024 | Das USB-Interface aus EMV-Sicht

5.3 Das Würth Elektronik eiSos USB 2.0 EMC Application Board

Im USB Applikations-Board wurden alle bisher diskutierten Punkte berücksichtigt.

Die Datenleitungen sind symmetrisch geroutet, alle Masseanschlüsse haben die kürzeste Verbindung zum Chassis, außerdem hat die Leiterplatte eine Masselage. Um zusätzlich Kopplungen zwischen den Leiterbahnen und zwischen den Bauelementen zu reduzieren wurde auch bauteileseitig der Leerraum mit Masse gefüllt. Alle Masseanschlüsse sind mindestens mit zwei Durchkontaktierungen versehen. In Abbildung 23 sind das Layout und beide Seiten der Leiterplatte dargestellt. In Abbildung 24 ist der damit aufgebaute USB-Dongle zu sehen, der Stromlauf entspricht dem in

Abbildung 13, das Layout dem in Abbildung 23. Deutlich erkennbar ist die über die USB-Buchsen optimal angeschlossene Bezugs- bzw. Gehäusemasse. Es ist selbstverständlich, dass dieser Massebezug nur dann gewährleistet ist, wenn auch die USB-Buchsen des Gerätes (PCs) niederimpedant, direkt am Gehäuse kontaktiert sind und auch das USB-Kabel, wie schon beschrieben geschirmt ist.

Die folgenden Kurven in Abbildung 25, Abbildung 26, Abbildung 27 zeigen (von oben nach unten) die Einfügungsdämpfung des Stromversorgungsfilters, die Impedanz symmetrisch und asymmetrisch des Datenleitungsfilters und die Transientenbegrenzung des Datenleitungsfilters.

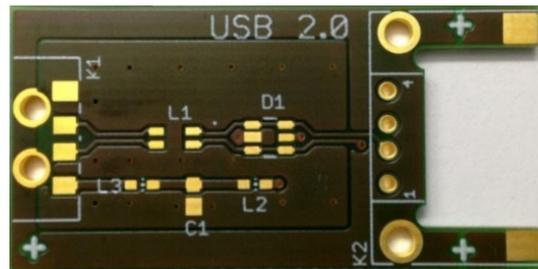
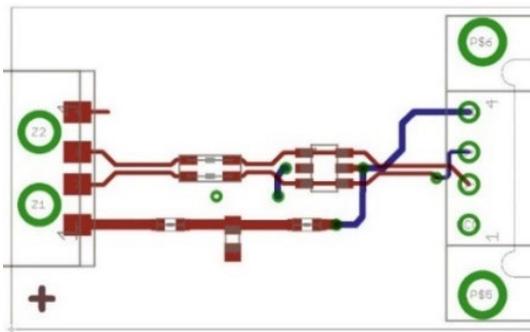


Abbildung 23: Layout und Bestückungsseite des EMC Applikations-Boards für USB.

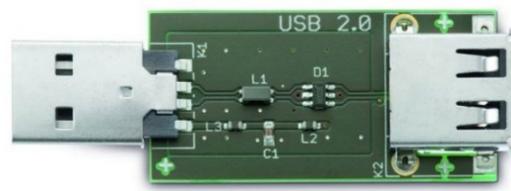


Abbildung 24: USB-Dongle, geschlossen und geöffnet, Layout nach Abbildung 23, Stromlauf nach Abbildung 13.

APPLICATION NOTE

ANP024 | Das USB-Interface aus EMV-Sicht

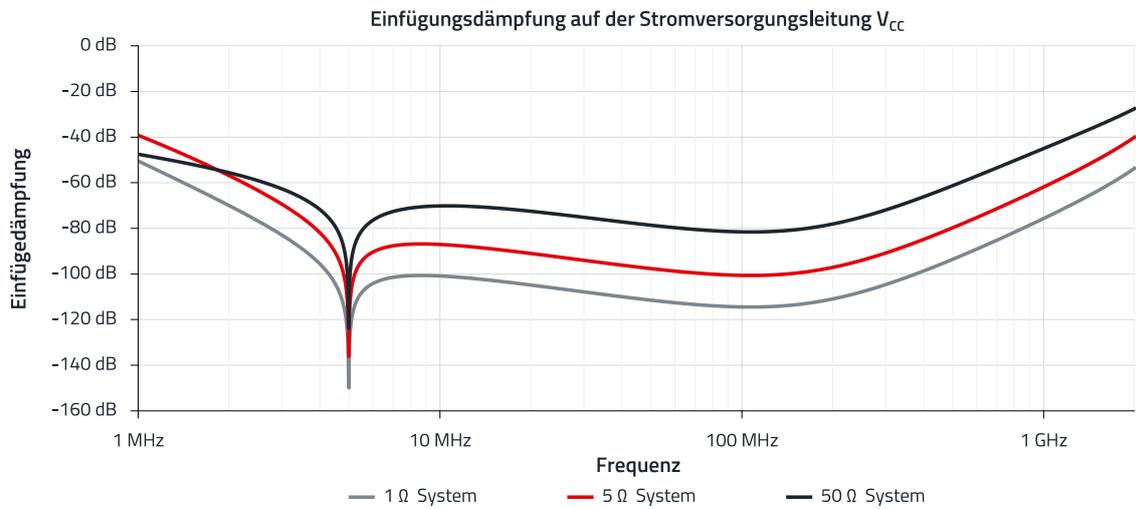


Abbildung 25: Einfügungsdämpfung des Stromversorgungsfilters.

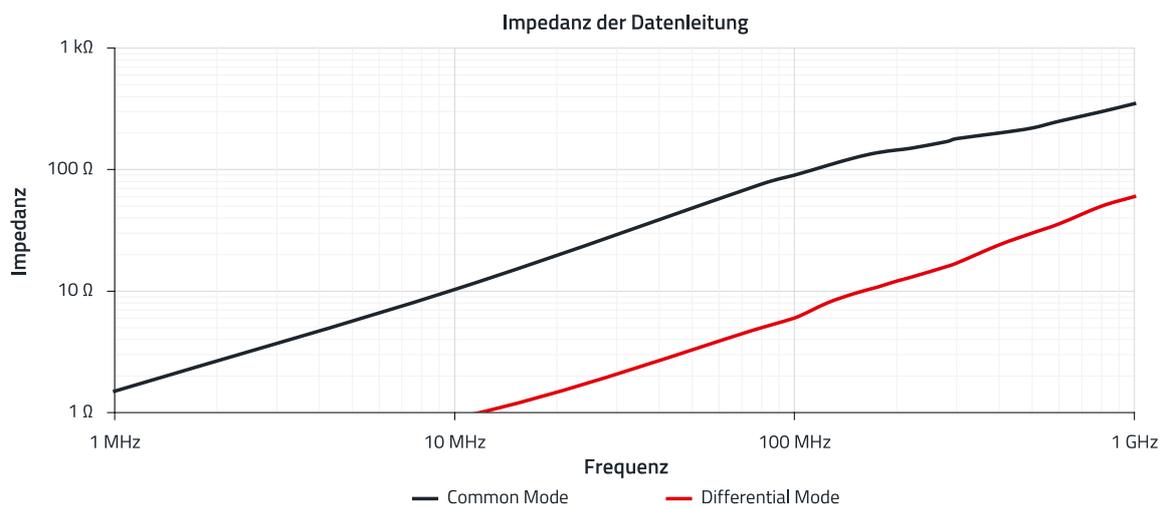


Abbildung 26: Impedanz des Datenleitungsfilters, symmetrisch und asymmetrisch.

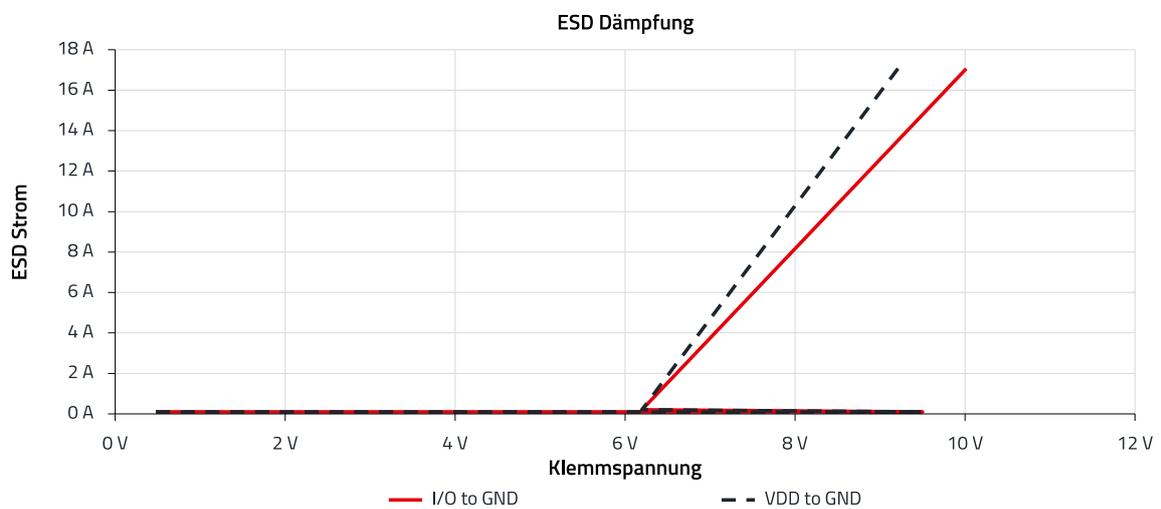


Abbildung 27: Spannungsbegrenzung des Datenleitungsfilters bezüglich transienter Störungen wie Burst und ESD.

APPLICATION NOTE

ANP024 | Das USB-Interface aus EMV-Sicht

Das Filter wird in der Regel am Controller Board innerhalb des Gerätes integriert sein. Um die Schaltungsentwicklung dem Ingenieur zu erleichtern und die Wirksamkeit überprüfen zu können, hat Würth den EMV-Applikation-Dongle entwickelt. Trotz optimalem Layout und Masseanschluss zu den USB-Buchsen benötigt der Dongle einen HF-gerechten Masseanschluss von den USB-Buchsen einerseits zur PC-Gehäusemasse und andererseits zum Kabel. Grund ist, dass sowohl der V_{cc} Filterkondensator (Abbildung 13) seinen HF-Störstrom als auch die Überspannungsdioden ihren HF-Störstrom und ggf. ihre Transientenstörströme ableiten müssen, das funktioniert natürlich nur gegen Masse bzw. Gehäuse. Abbildung 28 zeigt den Aufbau.



Abbildung 28: Anwendung des EMC-USB-Dongles.

So angewendet, als Signalquelle eine PC und als Peripherie eine USB-Festplatte ergibt sich ein Störemissionsspektrum nach Abbildung 29.

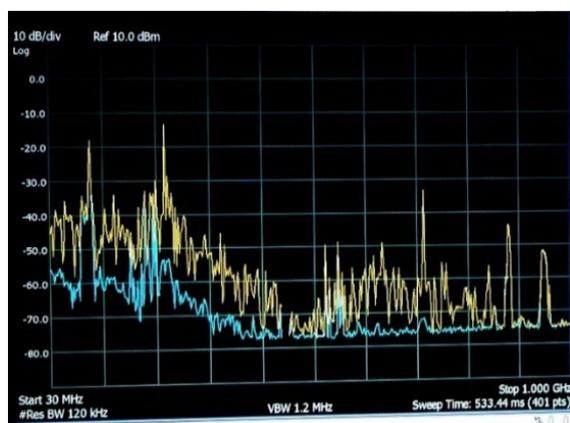


Abbildung 29: Störemissionsspektrum auf D+ vor und nach dem Datenleitungsfilter.

Die gelbe Kurve zeigt das Störspektrum auf D+ vor dem Filter, die blaue Kurve dahinter. Die Störungen nehmen zum Teil bis zu 35 dB ab. Der Betrag der Dämpfung hängt stark von der Impedanz der Störquelle ab, die Impedanz der Störquelle von der Art der Kopplung, also kapazitiv, induktiv oder gestrahlt. Je höher impedant die Störquelle ist, desto effektiver wird das Filter wirken.

Störer, die auf dem Massesystem des Gerätes sind, kann ein Filter natürlich nicht reduzieren, da der entsprechende Bezugs- bzw. Massepunkt fehlt.

In Abbildung 30 ist das Störspektrum vor und nach dem Stromversorgungsfilter gegeben. Auch hier erkennt man eine Reduzierung der Störer um ca. 20 dB.

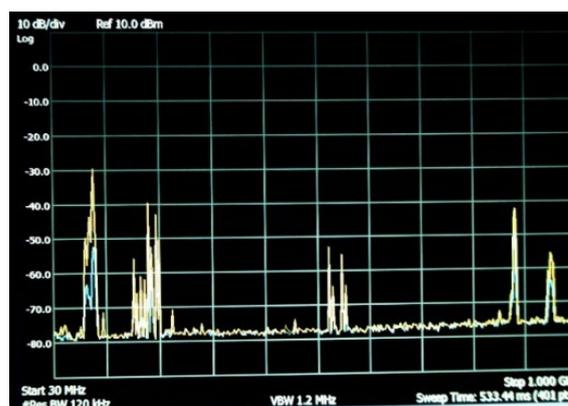


Abbildung 30: Störemissionsspektrum auf der Stromversorgungsleitung vor und nach dem Filter.

5.4 Die USB 2.0 EPLE Buchse mit integriertem Filter

Filterdesign hat seine Tücken, das zeigen zahlreiche Praxisbeispiele. Alle diese Tücken sind beherrschbar, aber Randbedingungen wie Platzbedarf, Mechanikkonzept und viele andere lassen ein „gutes“ Filterdesign oft nicht zu. Auch die nachträgliche Ergänzung eines Filters, z.B. notwendig nach EMV-Zulassungsmessungen, stellen sich oft als kostspielig und zeitintensiv heraus.

Deshalb bietet Würth Elektronik eine USB – Buchse mit integriertem USB-Filter an (siehe Abbildung 31).

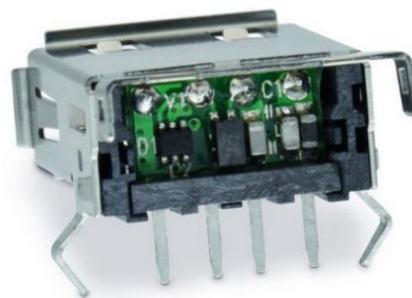


Abbildung 31: USB-Buchse mit integriertem EMV-Filter.

APPLICATION NOTE

ANP024 | Das USB-Interface aus EMV-Sicht

Die wichtigsten technischen Daten sind:

- ESD, bzw. Überspannungsschutz auf < 10 V bei 15 kV Entladespannung
- Datenleitungsämpfung an 90 Ω bei 100 MHz von > 10 dB asymmetrisch (von Quell- und Senken-Impedanz abhängig)
- Dämpfung an der Spannungsversorgung bei 100 MHz: > 40 dB (von Quell- und Senken-Impedanz abhängig), das Filter dämpft zuverlässig bis über 1 GHz

Das Filter ist somit hervorragend geschirmt und hat einen optimalen Massebezug. Zusätzlich wird durch die extrem kleine Bauform ein Koppeln zwischen den Bauelementen und Leiterbahnen in dem Nutzfrequenzbereich bis 1 GHz stark reduziert. Durch einfachen Austausch schon vorhandener ungefilterter Buchsen durch diese, ist die Anwendung äußerst bequem und zeigt unmittelbar ihre Wirksamkeit.

6. ZUSAMMENFASSUNG

EMV ohne Filter ist in der heutigen Schaltungstechnik nicht mehr möglich. Elektronik auf engstem Raum, Nutzfrequenzen bis in den GHz-Bereich und auch die Berücksichtigung der EMV-Normen machen die Anwendung notwendig. EMV ist nicht „nice to have“ oder Befriedigung von Regularien bzw. Normen, sondern ein Qualitätsmerkmal auf das der Anwender des Produktes ein Recht hat. Dennoch ist oftmals EMV auch eine ingenieurmäßige Herausforderung und ein Balanceakt zwischen Performance und Zeit. Würth Elektronik möchte ihnen sowohl die nötigen Komponenten als auch das nötige Know-How zur Verfügung stellen, um bei ihrem Design der USB-Schnittstelle bestmöglich zu unterstützen. Wir hoffen, das ist mit den vorgestellten Produkten und diesem kleinen Fachartikel geschehen und wünschen Ihnen bei ihrem nächsten Design viel Erfolg.

7. BILL OF MATERIALS

Beschreibung	Bauform	Elektrische Spezifikation	Artikel Nr.
WE-CBF SMT-Ferrit	EIA 0603	$Z = 600 \Omega$; $I_R = 1 A$; $R_{DC} = 0,2 \Omega$	742792651
WCAP-CSGP MLCCs 16 V (DC)	0603	X7R; 680 nF $\pm 10\%$; 16 V	885012206051
WE-CNSW Stromkompensierter SMT Line Filter	1206	$Z = 90 \Omega$; $I_R = 370 mA$; $R_{DC} = 0,3 \Omega$	744232090
WE-TVS TVS Diode – High Speed Series	SOT23-6L	$V_{RWM} = 5 V$; 4+1 channel; $C_{Ch} = 2 pF$	82400102
Filter Stick USB 2.0 Typ A EMV	USB A-A	USB 2.0, 90 Ω_{Diff} ; 1 A; ESD+EMI protected	829999STICK
WE-EPL USB 2.0 A Steckverbinder	USB A	USB 2.0, 90 Ω_{Diff} ; 1 A; ESD+EMI protected	8492121

APPLICATION NOTE

ANP024 | Das USB-Interface aus EMV-Sicht

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