

APPLICATION NOTE

Das USB Interface aus EMV Sicht



ANP024c VON HEINZ ZENKNER

1. Technologien und Kennzahlen

Die USB [Universal Serial Bus] Spezifikation definiert die mechanischen, elektrischen sowie dem 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 10kb/sek bis zu 480Mb/sek in einem der 3 möglichen Datenratenmodi.

- 10-100 kb/sek für langsame Datenübertragung (Maus, Tastatur). Die Signalspannung beträgt 0V bis 0.3V.
- 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 $400\text{ mV} \pm 10\%$ (high)

Bei hohen Datenübertragungsraten ist es erforderlich die symmetrischen Leitungspärchen mit einem $45\ \Omega$ Abschlusswiderstand jeweils nach Masse abzuschließen. Die Kabelimpedanz muss hier $90\ \Omega \pm 15\%$ (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 Photos 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 allein stehende 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. Dass äußert sich dann in Schreib-/Lesefehlern bei Laufwerken, Drop outs bei Kameras, Schreibverzögerungen bei Tastaturen, usw. Aber dazu später mehr.

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 Abb. 1 dargestellt, die dazugehörige Pinbelegung in Tabelle 1.



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

USB 2.0 Pinbelegung und Kabel Assemblierung		
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 Abb. 2 dargestellt aufgebaut sein.

APPLICATION NOTE

Das USB Interface aus EMV Sicht

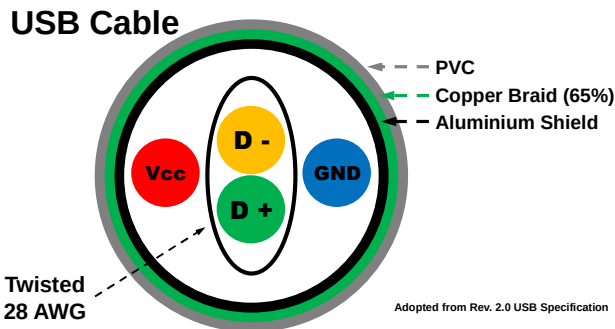


Abb. 2 USB Kabel Layout

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 45Ω , bzw. 90Ω (+/- 15%) zwischen den Adern. Der Kabelschirm soll ein Schirmgeflecht mit mindestens 65% Flächenbedeckungsgrad und zusätzlich ein Aluminiumschirm haben, d.h. es ist eine doppelte Schirmung vorgesehen um eine hohe Schirmdämpfung und einen gleich bleibenden 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 Aluschirm 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 Schaltungskonzept hinsichtlich EMV entwickelt sein. Deshalb müssen

- Schaltungskonzept
- 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 gleich bleibender Qualität billiger!

3. EMV Kriterien

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

EMV = gesicherte Funktionalität

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 zus. 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 Anwendungs-

APPLICATION NOTE

Das USB Interface aus EMV Sicht



gebiet hat andere normative EMV-Anforderungen, aber denken wir an unsere Gleichung:

EMV = gesicherte Funktionalität

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 Abb. 3 dargestellt.

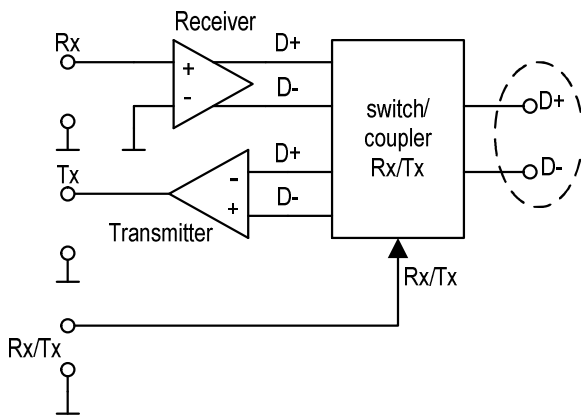


Abb. 3: Das USB Interface ist symmetrisch und bidirektional

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

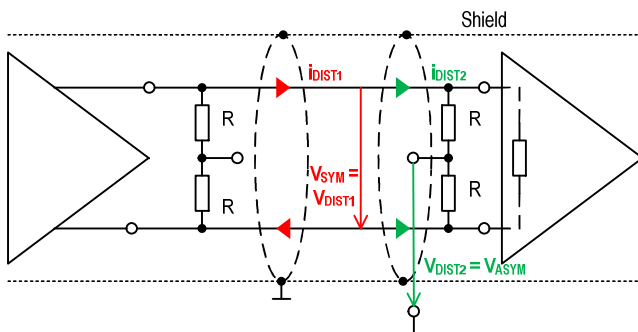


Abb. 4: Die symmetrische Schnittstelle mit ihren messbaren Störpotentialen

Messbar sind:

- a) $\underline{U}_{\text{sym}}$: Störspannung zwischen den Signaladern
- b) $\underline{U}_{\text{Asym}}$: 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 Störpotentialen 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. Abb. 5 verdeutlicht den Fall.

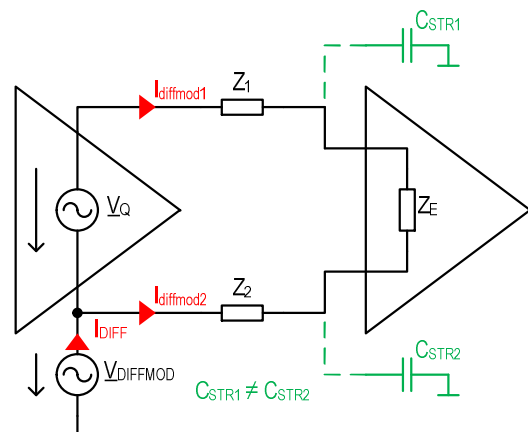


Abb. 5: Konvertierung von symmetrischen zu asymmetrischen Störungen aufgrund von parasitären Koppelkapazitäten.

4.2. Störfestigkeit

Für den Fall der Einwirkung von Störungen auf den USB bietet die symmetrische Datenübertragung einen wesentlichen Vorteil gegenüber der einfachen Koaxialleitung.

APPLICATION NOTE

Das USB Interface aus EMV Sicht

In Abb. 6 ist die Störeinwirkung auf eine Koaxialleitung dargestellt. 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.

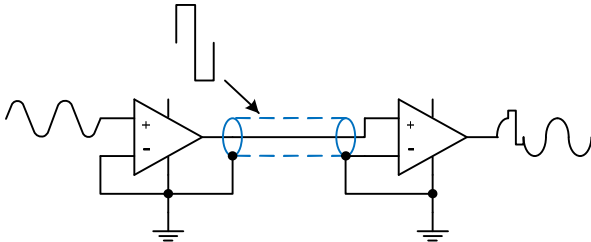


Abb. 6: Einwirkung einer Störung auf eine koaxiale Datenübertragungsstrecke

Abb. 7 stellt den Fall der symmetrischen Datenübertragung dar, hier vorerst mit einem lediglich verdrehten Aderpaar. 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 Störeinwirkung (Magnetfeld) eine Kompensation der Störeinwirkung erreicht. Durch die Symmetrisierung der Teilinduktivitäten der jeweiligen Verdrehung kompensieren sich die Störbeeinflussungen gegeneinander.

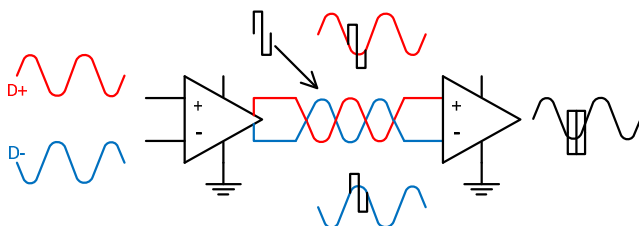


Abb. 7: Kompensation von elektrischer Störeinkopplung am symmetrischen Signaleingang und verdrehten Aderpaaren

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 Wellenwiderstandsanpassung 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 Fremdstörern 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 und den USB-Schnittstellen erfüllt werden. Abb. 8 zeigt die Grundsaltung eines symmetrischen USB - Signalfilters.

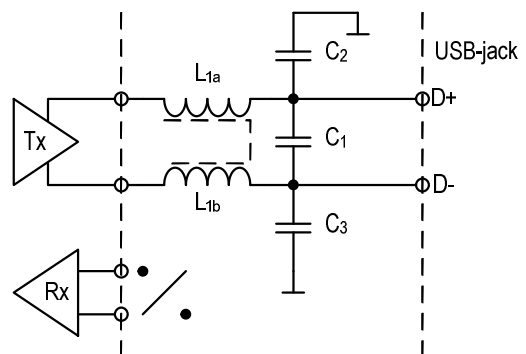


Abb. 8: Grundsaltung eines symmetrischen Signalfilters

Kapazitäten bis ca. 3pF 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 C2 und C3 reduzieren mit der stromkompensierten Drossel die symmetrischen Störanteile. Auf das Signal wirkt die Kapazität C2/2 bzw. C3/2. Es versteht

APPLICATION NOTE

Das USB Interface aus EMV Sicht

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. Die Drossel muss eine hohe Symmetrie bei kleiner Streukapazität zwischen $L1a$ und $L1b$ 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. Abb. 9 verdeutlicht die Zusammenhänge. Das Ferritmaterial hat seinen Übergangsbereich bei etwa 200MHz.

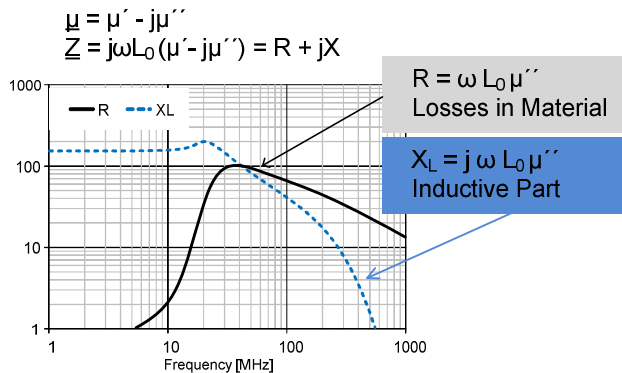


Abb. 9: Beispiel für den Verlauf der komplexen und realen Permeabilitätsanteile eines „HF“ - Ferritmaterials

Transiente Störsignale, wie ESD und Bursts können grundsätzlich mit Varistoren und begrenzt werden. Besonders SMD 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 Abb. 10 dargestellt. 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 0,7V. Es zeigt sich hier sehr schnell ein Problem, deshalb ist das rechte Diodenpaar mit 2 roten Blitzen versehen: Die Signalspannung des „Mid-speed“ – Signals beträgt bis 2,8V ($D+$ zu $D-$), also 1,4V zu Masse. Der positive Zweig muss also mit einem „offset“ versehen werden, um die höheren Signalspannungen nicht zu beeinträchtigen.

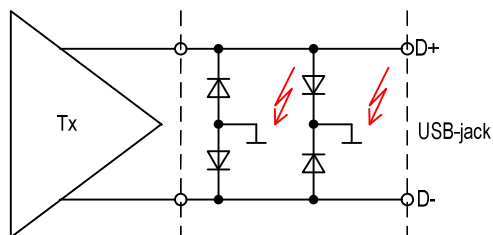


Abb. 10: Diodenbegrenzer zur Reduktion von gekoppelten Transienten (Burst, ESD) auf die USB - Schnittstelle

Abb. 11 zeigt die Lösung. 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 Abb. 12 verdeutlicht.

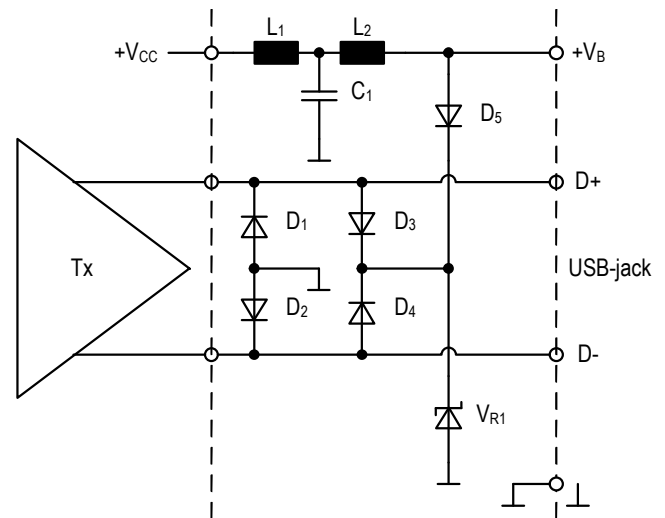


Abb. 11: Diodenbegrenzer zur Reduktion von gekoppelten Transienten (Burst, ESD) auf die USB – Schnittstelle mit „offset“ für höhere Signalpegel

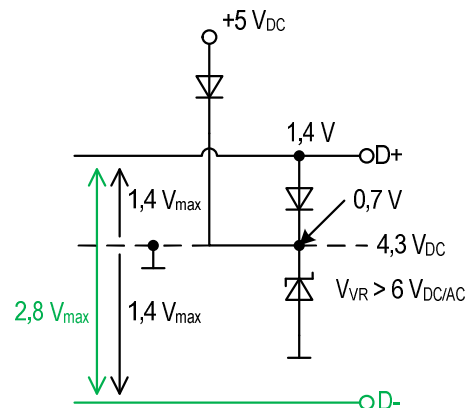


Abb. 12: Pegelbilanz der positiven Diodenstrecke

Über die zusätzliche Diode D_5 in Abb. 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 $VR1$ jedoch in Reihe mit D_3 bzw. D_4 liegt, bewirkt die Kapazität von $VR1$ hier eine Verringerung der Gesamtkapazität, die das Signal beeinflusst – ist also unkritisch, da D_3 und D_4 Kapazitäten von ca. 2pF haben. D_3 und D_4 liegen wie in Abb. 8 die Kondensatoren bezüglich des Signals in Reihe, somit ergibt sich eine gesamte kapazitive Belastung Signal zu Signal von 2pF und Signal gegen Masse mit etwa 3 pF.

APPLICATION NOTE

Das USB Interface aus EMV Sicht



Im Versorgungsspannungszweig ist ein T-Filter mit 2 SMD 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

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

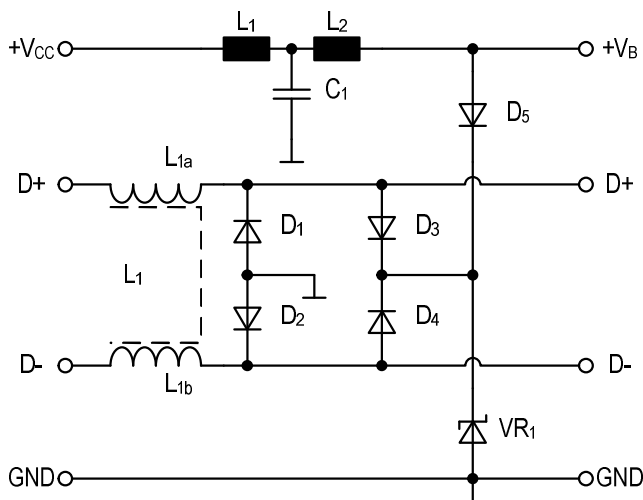


Abb. 13: Gesamtschaltbild des USB 2.0 - Filters

5.2.1. Filter für die DC-Versorgung

Der SMD 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 wirkt der Ferrit wie ein ohmscher Widerstand ohne Blindanteile. Eine Übersicht über die wichtigsten Parameter zeigt Tabelle 2, in Abb. 14 ist der Impedanzverlauf dargestellt.

Properties	Test conditions		Value	Unit	Tol.
Impedance @ 100MHz	100 MHz	Z	600	Ω	$\pm 25\%$
Maximum Impedance	200 MHz	Z	800	Ω	typ.
Rated Current	$\Delta T = 40\text{ K}$	I_R	1000	mA	max.
DC Resistance		R_{DC}	0.20	Ω	max.

Tabelle 2: Elektrische Kenndaten des SMD Ferrits 742792651

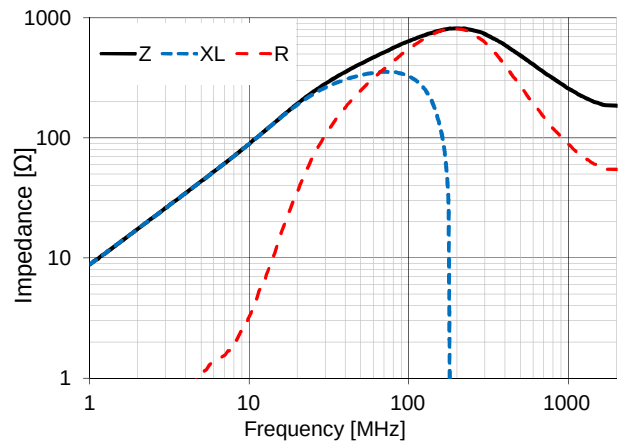


Abb. 14: Impedanzverlauf des SMD-Ferrits 742792651

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

- Max. Spannung: 16 V
- Kapazität: 680 nF
- Toleranz: 10 %
- Keramik: X5R

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 X5R 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. D. h. schon vorab: Auch der Masseanschluss (Layout!) des Kondensators muss niederinduktiv sein um die Gesamtimpedanz möglichst klein zu halten. Abb. 15 verdeutlicht den Zusammenhang.

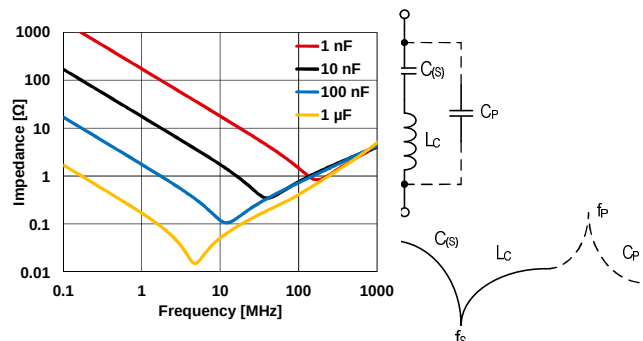


Abb. 15: Der Kondensator mit seinen parasitären Eigenschaften (vereinfacht)

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

APPLICATION NOTE

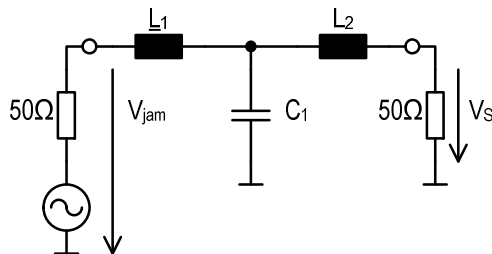
Das USB Interface aus EMV Sicht



SMD Kondensatoren in der Bauform 0804 mit X5R 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 nieder impedant sind. So ergibt sich eine optimale Fehlanpassung und dadurch die maximale Dämpfung.

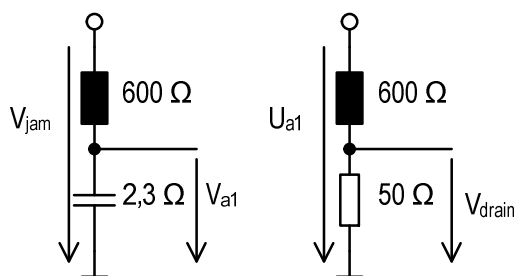
In Abb. 16 ist die theoretisch mögliche Einfügungsdämpfung als Beispiel in einem 50 Ω System berechnet. Es ergibt sich eine maximale Dämpfung bei 100 MHz von 70 dB. Das sollte auch für die größten Härtefälle ausreichend sein!



assumption: source, drain=50 Ω

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

$$C_1: 680 \text{ nF} = \frac{1}{2\pi f \cdot 680 \cdot 10^{-12}} \Omega @ 100 \text{ MHz} \rightarrow 2,3 \Omega$$



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

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

$$a_{\text{ges}} = 48 \text{ dB} + 22 \text{ dB} = 70 \text{ dB}$$

Abb. 16: Berechnung der Einfügungsdämpfung des T – Filters in der Versorgungsspannung

Einfügungsdämpfung erreicht werden. In Abb. 17 ist der Aufbau dargestellt, Tabelle 3 zeigt die wichtigsten Parameter.

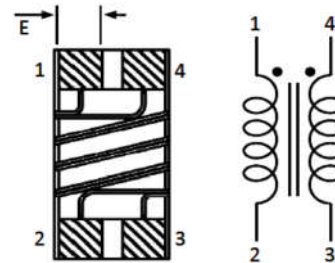


Abb. 17: Stromkompensierte Drossel 744232090 für das Datenleitungsfilter

Properties	Test cond.		Value	Unit	Tol.
Impedance	100 MHz	Z	90	Ω	±25%
Rated Voltage		U_R	50	V	max.
Rated Current	$\Delta T = 40 \text{ K}$	I_R	370	mA	max.
R_{DC}	@ 20°C	R_{DC}	0.30	Ω	max.

Tabelle 3: Elektrische Kenndaten der Stromkompensierten Drossel 744232090

In Abb. 18 ist der Impedanzverlauf der Drossel im „Common Mode“ dargestellt. 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 Skinneffekt zustande. Bei 100 MHz hat diese Drossel eine Impedanz von 6 Ω (beide Wicklungen zusammen).

5.2.2. 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

APPLICATION NOTE

Das USB Interface aus EMV Sicht

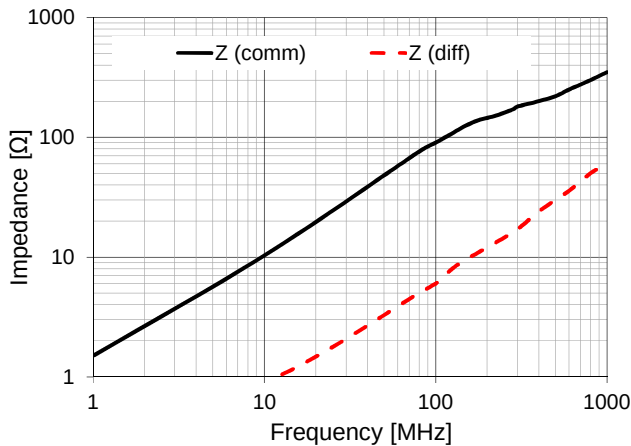


Abb. 18: Impedanzverlauf der stromkompensierten Drossel 744 232 090

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 Transientenschutz. Die wichtigsten elektrischen Kenndaten und der Aufbau des Arrays sind in Abb. 19 gegeben.

Properties	Test Conditions	Value typ.	Value max.	Unit
C_{IO}	$V_{Pin5}=5V, V_{Pin2}=0V, V_{IO}=2.5V, f=100MHz, I/O \text{ to GND}$	2.0	2.5	pF
C_x	$V_{Pin5}=5V, V_{Pin2}=0V, V_{IO}=2.5V, f=100MHz, I/O \text{ to GND}$	0.4	0.6	pF

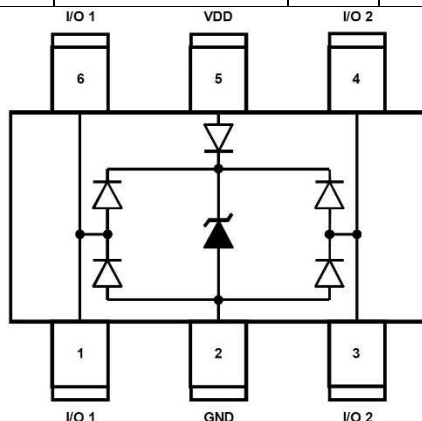
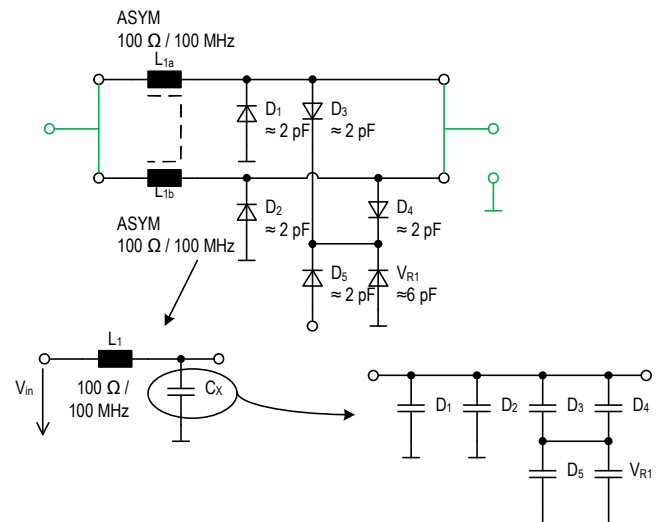


Abb. 19: Elektrische Kenndaten und Aufbau des Diodenarrays WE-TVS 82400102

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 Abb. 20.



$$C_x = 6,6 \text{ pF}$$

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

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

Abb. 20: Berechnung der Einfügungsdämpfung des USB-Datenleitungsfilters

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!

5.2.3 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. Abb. 21.

APPLICATION NOTE

Das USB Interface aus EMV Sicht

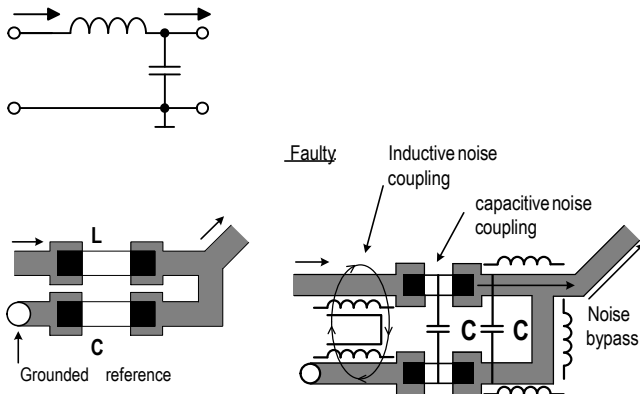


Abb. 21: Beispiel eines Tiefpasses für hohe Frequenzen mit mangelhaftem Layout

Was ist am Layout in Abb. 20 falsch:

- Der Masseanschluss zum Kondensator ist zu lang. 1cm 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.
- Die Bauelemente koppeln kapazitiv, da sie parallel zueinander liegen. Auch hier wird die Koppelung mit steigender Frequenz größer.
- In Abb. 22 ist das korrigierte Layout mit der dazugehörigen HF – gerechten Anordnung der Bauelemente zu sehen.

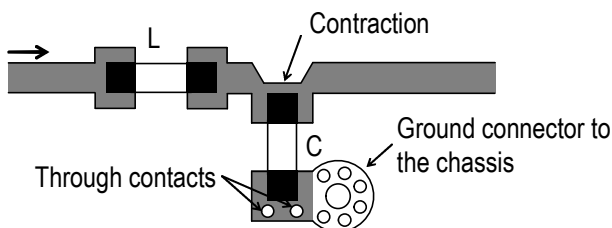


Abb. 22: HF-Optimiertes Layout eines LC-Filters

Was ist am Layout in Abb. 22 richtig?

- Die Einschnürung verhindert, dass Störstrom am Kondensator vorbeigeleitet wird. Der Kondensator „liegt“ im Signalpfad.
- Die rechtwinklige 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.

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 Abb. 23 sind das Layout und beide Seiten der Leiterplatte dargestellt. In Abb. 24 ist der damit aufgebaute USB Dongle zu sehen, der Stromlauf entspricht dem in Abb. 13, das Layout dem in Abb. 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.

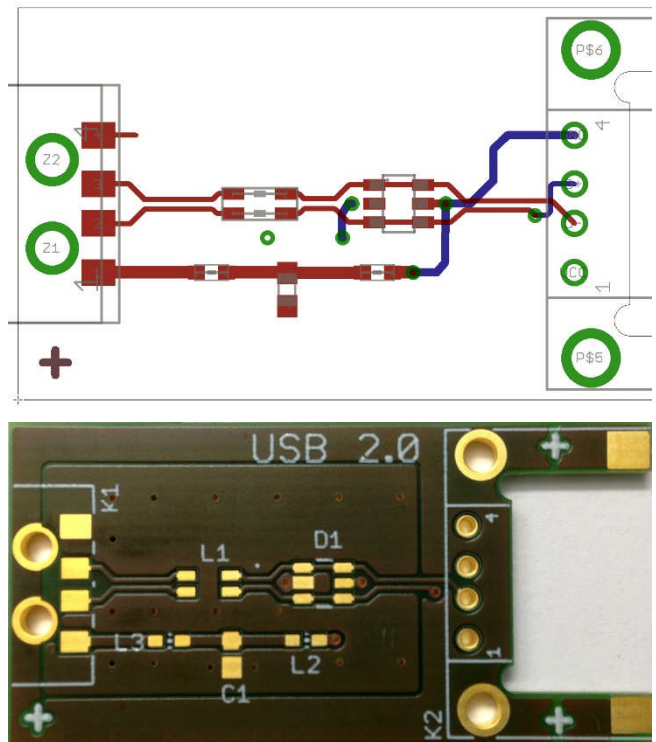


Abb. 23: Layout und Bestückungsseite des EMC Application Boards für USB

APPLICATION NOTE

Das USB Interface aus EMV Sicht

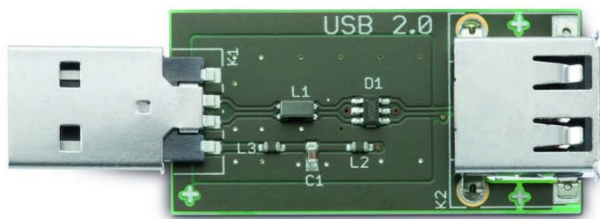


Abb. 24: USB Dongle, geschlossen und geöffnet, Layout nach Abb. 23, Stromlauf nach Abb. 13

Die folgenden Kurven in Abb. 25 a-c zeigen (von oben nach unten) die Einfügungsdämpfung des Stromversorgungsfilters, die Impedanz symmetrisch und asymmetrisch des Datenleitungsfilters und die Transientenbegrenzung des Datenleitungsfilters.

VCC Line Noise Suppression

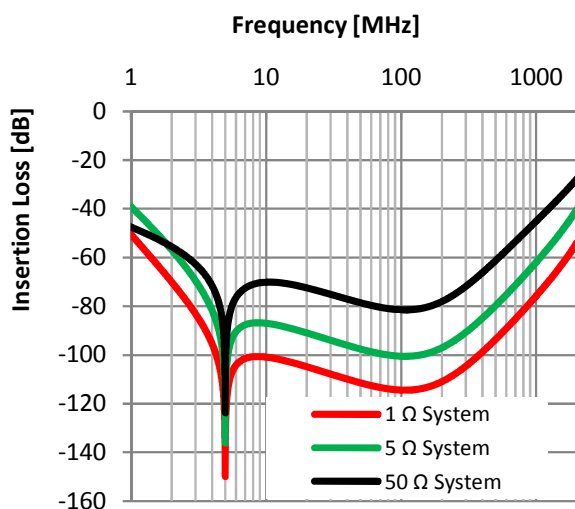


Abb. 25a: Einfügungsdämpfung des Stromversorgungsfilters

Data Line Impedance

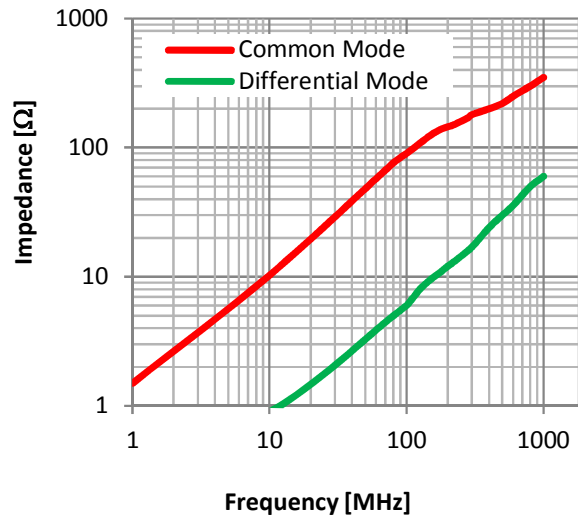


Abb. 25b: Impedanz des Datenleitungsfilters, symmetrisch und asymmetrisch

ESD Suppression

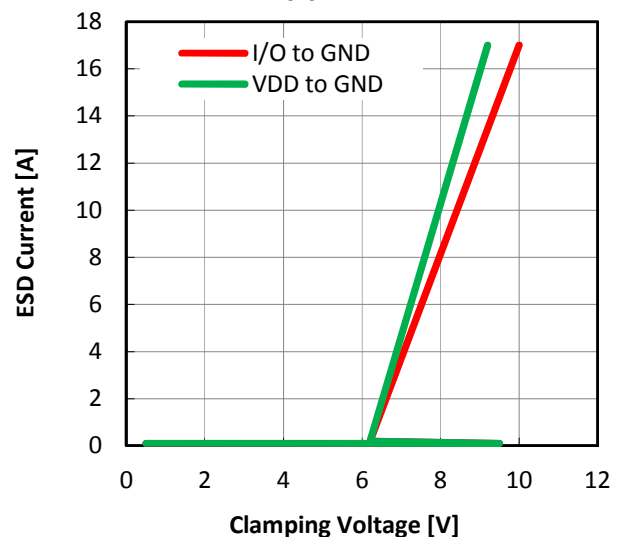


Abb. 25c: Spannungsbegrenzung des Datenleitungsfilters bezüglich transientser Störungen wie Burst und ESD

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 EMC Application 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 Vcc Filterkondensator (Abb. 13) seinen HF-Störstrom als auch die

APPLICATION NOTE

Das USB Interface aus EMV Sicht



Überspannungsdioden ihren HF-Störstrom und ggf. ihre Transientenstörströme ableiten müssen, das funktioniert natürlich nur gegen Masse bzw. Gehäuse. Abb. 26 zeigt den Aufbau.

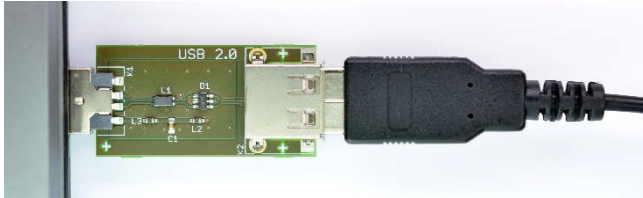


Abb. 26: Anwendung des EMC-USB-Dongles

So angewendet, als Signalquelle eine PC und als Peripherie eine USB Festplatte ergibt sich ein Störemissionsspektrum nach Abb. 27. 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.

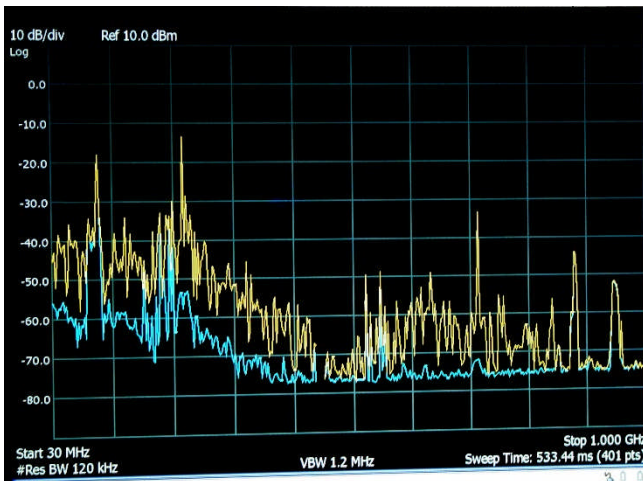


Abb. 27: Störemissionsspektrum auf D+ vor und nach dem Datenleitungsfilter

In Abb. 28 ist das Störspektrum vor und nach dem Stromversorgungsfilter gegeben. Auch hier erkennt man eine Reduzierung der Störer um ca. 20 dB.

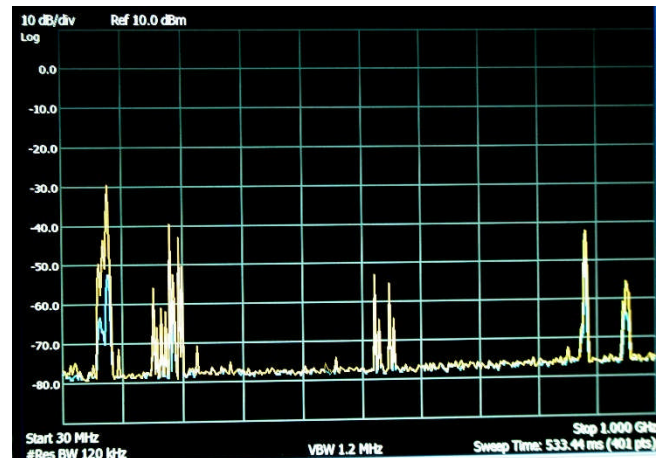


Abb. 28: Störemissionsspektrum auf der Stromversorgungsleitung vor und nach dem Filter

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.

Die wichtigsten technischen Daten sind:

- ESD, bzw. Überspannungsschutz auf < 10V bei 15kV Entladespannung
- Datenleitungsdämpfung an 90 Ω bei 100 MHz von > 10 dB asymmetrisch (von Quell – und Senkenimpedanz abhängig)
- Dämpfung an der Spannungsversorgung bei 100 MHz: > 40 dB (von Quell- und Senkenimpedanz 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 1GHz stark reduziert. Durch einfachen Austausch schon vorhandener ungefilterter Buchsen durch diese macht die Anwendung äußerst bequem und zeigt unmittelbar die Wirksamkeit.

APPLICATION NOTE

Das USB Interface aus EMV Sicht

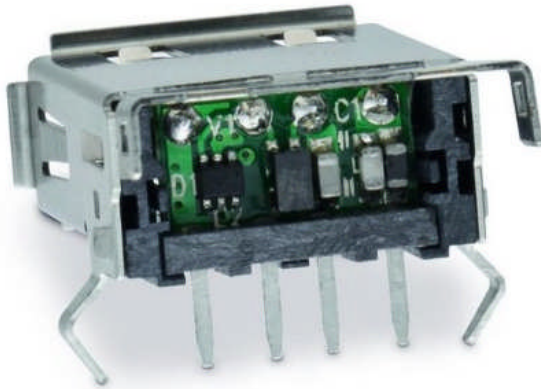


Abb. 29: USB-Buchse mit integriertem EMV-Filter

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 ihren 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.

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

7. Bill of Materials

Description	Package	Electrical Specification	Order Code
WE-CBF EMI Ferrite Bead	EIA 0603	$Z = 600 \Omega$; $I_R = 1A$; $R_{DC} = 0,2 \Omega$	742 792 651
MLCC 0603X684K5RAC	0603	X5R; 680 nF; 16 V	
WE-CNSW CM Choke	1206	$Z = 90 \Omega$; $I_R = 370 \text{ mA}$; $R_{DC} = 0,3 \Omega$	744 232 090
WE-TVS HighSpeed	SOT23-6L	$V_{RWM} = 5 \text{ V}$; 4+1 Channel; $C_{Ch} = 2 \text{ pF}$	824 001 02
EMC USB Adapter	USB A-A	USB 2.0, $90 \Omega_{Diff}$; 1 A; ESD+EMI protected	829 999 STICK
WE-USBH EPLE connector	USB A	USB 2.0, $90 \Omega_{Diff}$; 1 A; ESD+EMI protected	849 21 21

APPLICATION NOTE

Das USB Interface aus EMV Sicht



IMPORTANT NOTICE

Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG and its subsidiaries and affiliates (WE) are not liable for application assistance of any kind. Customers may use WE's assistance and product recommendations for their applications and design. The responsibility for the applicability and use of WE Products in a particular customer design is always solely within the authority of the customer. Due to this fact it is up to the customer to evaluate, where appropriate to investigate and decide whether the device with the specific product characteristics described in the product specification is valid and suitable for the respective customer application or not.

The technical specifications are stated in the current data sheet of the products. Therefore the customers shall use the data sheets and are cautioned to verify that data sheets are current. The current data sheets can be downloaded at www.we-online.com. Customers shall strictly observe any product-specific notes, cautions and warnings. WE reserve the right to make corrections, modifications, enhancements, improvements, and other changes to its products and services.

WE DOES NOT WARRANT OR REPRESENT THAT ANY LICENSE, EITHER EXPRESS OR IMPLIED, IS GRANTED UNDER ANY PATENT RIGHT, COPYRIGHT, MASK WORK RIGHT, OR OTHER INTELLECTUAL PROPERTY RIGHT RELATING TO ANY COMBINATION, MACHINE, OR PROCESS IN WHICH WE PRODUCTS OR SERVICES ARE USED. INFORMATION PUBLISHED BY WE REGARDING THIRD-PARTY PRODUCTS OR SERVICES DOES NOT CONSTITUTE A LICENSE FROM WE TO USE SUCH PRODUCTS OR SERVICES OR A WARRANTY OR ENDORSEMENT THEREOF.

WE products are not authorized for use in safety-critical applications, or where a failure of the product is reasonably expected to cause severe personal injury or death. Moreover WE products are neither designed nor intended for use in areas such as military, aerospace, aviation, nuclear control, submarine, transportation (automotive control, train control, ship control), transportation signal, disaster prevention, medical, public information network etc. Customers shall inform WE about the intent of such usage

before design-in stage. In certain customer applications requiring a very high level of safety and in which the malfunction or failure of an electronic component could endanger human life or health customers must ensure that they have all necessary expertise in the safety and regulatory ramifications of their applications, and acknowledge and agree that they are solely responsible for all legal, regulatory and safety-related requirements concerning their products and any use of WE products in such safety-critical applications, notwithstanding any applications-related information or support that may be provided by WE. CUSTOMERS SHALL INDEMNIFY WE AGAINST ANY DAMAGES ARISING OUT OF THE USE OF WE PRODUCTS IN SUCH SAFETY-CRITICAL APPLICATIONS.

USEFUL LINKS

Application Notes:

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

REDEXPERT Design Tool:

<http://www.we-online.com/redexpert>

Toolbox:

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

Product Catalog:

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

CONTACT INFORMATION

Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG

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

Tel.: +49 (0) 7942 / 945 – 0

Email: appnotes@we-online.de

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