

Den richtigen Kondensator wählen

Designregeln zur Entkopplung hochfrequenter Störstrahlung

Kondensatoren zur Entkopplung oder Dämpfung hochfrequenter Störspannungen werden häufig noch nach Kriterien ausgewählt, wie sie seit mehreren Jahrzehnten üblich sind. Das Spektrum der Störspannungen hat sich aber zu höheren Frequenzen hin verschoben. Vor allem aber hat das Störspektrum eine „Schallmauer“ durchbrochen: Der Hauptteil liegt heute über der Eigenresonanzfrequenz üblicher Kondensatoren. Damit sind neue Denksätze bezüglich Entkopplung und Dämpfung gefordert. ANDREAS LENKISCH

In den letzten zehn Jahren hat sich die Taktfrequenz von CPUs fast um Faktor 100 erhöht und dementsprechend hat sich auch das Frequenzspektrum der Störspannungen zu wesentlich höheren Frequenzen verschoben. Aber auch „langsame“ Baugruppen können hochfrequente Störspannungen generieren. Werden diese auf dem Board nicht wirkungsvoll gedämpft, sind die Kosten, die später zur Erlangung der EMV aufgewendet werden müssen, deutlich höher als entsprechende Maßnahmen auf dem Board. Doch die Dämpfung hochfrequenter Störspannungen erfordert neue Denkweisen und das Verlassen ausgetretener Pfade.

Den parasitären Elementen der zur Entkopplung eingesetzten Bauteile wird oft zu wenig Bedeutung beigemessen. Das alte Konzept, vom Wert her „große“ Kondensatoren für die tiefen Frequenzen und „kleine“ Kondensatoren für die hohen Frequenzen einzusetzen, ist nicht unbedingt richtig und erfolgreich. Die Parallelschaltung unterschiedlicher Kondensatoren kann ebenfalls problematisch werden. Auch reicht es nicht, dass die Kondensatoren für die höheren Frequenzen vom Wert her nur „klein“ sind. Auch andere Kriterien sind mit entscheidend.

Mit neuen Generationen von Computer-Boards ist in der Regel ein Anstieg der Taktfrequenz verbunden. So hat sich in den letzten zehn Jahren die Taktrate von CPUs im PC um Faktor 50 bis 100 erhöht. Die Taktraten

der nachgeschalteten Baugruppen müssen mithalten, wenn nicht ein Engpass in der Leistung des Gesamtsystems entstehen soll. Industrieanwendungen folgen dem Trend im Desktop-Bereich zwar nicht so schnell, können sich ihm aber aufgrund der Bauteilverfügbarkeit aber auch nicht ganz entziehen. So verschiebt sich das Spektrum der Störspannungen immer weiter zu höheren Frequenzen, die mit den bisherigen Methoden nicht mehr richtig entkoppelt werden können.

Auch langsame Schaltungen können kritisch sein

Es ist aber nicht die Taktfrequenz allein, die Probleme mit der EMV hervorruft. Die Flankensteilheit der Signale und damit verbunden die Änderung der Stromaufnahme der Schaltkreise generiert an den induktiven Elementen im Versorgungspfad Störspannungen. Das heißt, auch „langsame“ Schaltungen können dieselben Probleme verursachen wie „High Speed“-Schaltungen. Werden die Signale von denselben Bausteinen getrieben, so ist die Flankensteilheit gleich und es werden dieselben Störspannungen an induktiven Anteilen im Versorgungspfad generiert:

$$U_L = L \, di/dt \quad (1)$$

So wurden z.B. auf einer Versorgungsspannung Störungen von einem getakteten Netzteil gemessen. Die Grundfrequenz lag bei etwa 100 kHz, ein heute noch typischer Bereich für die Arbeitsfrequenz des Wandlers und eigentlich weit entfernt von „High Speed“. Es sollte deshalb kein Problem für die Filterung sein. Die Störungen sind aber nicht sinusförmig, sondern es sind Nadelimpulse mit einer Flankensteilheit, die einer Sinusfrequenz von etwa 50 MHz entsprechen. Damit sind herkömmliche Elkos völlig

überfordert. Auch spezielle Kondensatoren für getaktete Netzteile, können diese Störimpulse nicht mehr dämpfen. Und die „kleinen“ keramischen Kondensatoren sind bei 50 MHz auch nicht mehr besonders wirkungsvoll.

Parasitäre Elemente

Kondensatoren gehören zu den wenigen Produkten, bei denen man noch mehr als erwartet für sein Geld bekommt. Man kauft einen Kondensator (Kapazität) und bekommt sozusagen ein ganzes passives Netzwerk geschenkt dazu (Abb. 1). Aber wie das mit kostenlosen Zugaben oder Werbebeschenken so ist, man kann sie selten gebrauchen. In diesem Fall entpuppen sie sich sogar als „Büchse der Pandora“.

Die parasitären Elemente, die die Entkopplung im Hochfrequenzbereich wesentlich

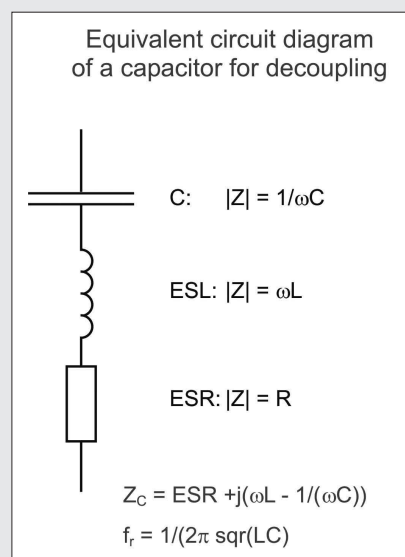


Abb. 1: Ersatzschaltbild eines Kondensators, Kondensatoren sind eigentlich Serienresonanzkreise

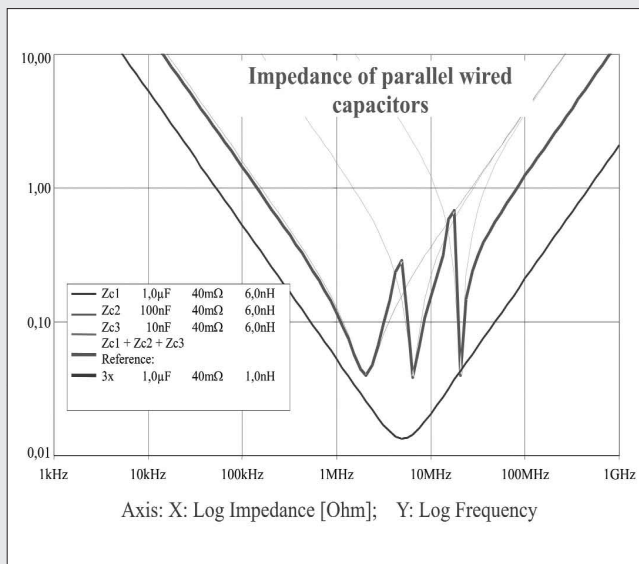


Abb. 2: Impedanzverläufe parallelgeschalteter Kondensatoren. Statt unterschiedliche Kapazitätswerte zu kombinieren, ist es besser, denselben Typ n-mal einzusetzen

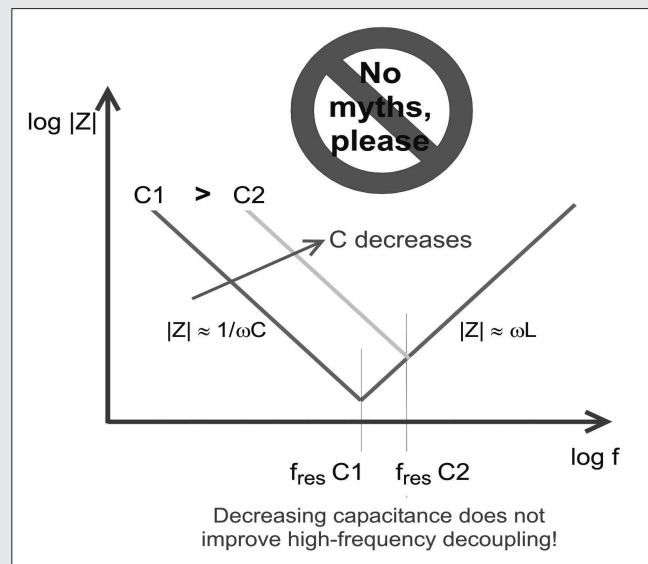


Abb. 3: Kleinere Kapazitätswerte verbessern nicht die Entkopplung, im Gegenteil: Im niederfrequenten Bereich ist die Wirksamkeit deutlich schlechter

bestimmen, sind der Ersatz-Serien-Widerstand (ESR) und die Ersatz-Serien-Induktivität (ESL) des Kondensators. In ersterem werden elektrische Verluste zusammengefasst, die im Dielektrikum beim Umladen des Kondensators auftreten sowie die ohmschen Widerstände der internen Zuleitungen. Die Induktivität der Zuleitungen und des Bauteils selbst, bestimmt durch die inneren Strompfade, werden im Ersatzschaltbild mit der Ersatz-Serien-Induktivität beschrieben. Während der ESR also stark von den Eigenschaften des Dielektrikums geprägt wird, ist die ESL nur von der Geometrie abhängig. Zur Geometrie sollen auch aufgeteilte Strompfade neuerer Bauteilkonstruktionen gezählt werden, deren Magnetfelder sich kompensieren und so die Induktivität des Bauteils verringern.

Beim Blick auf das Ersatzschaltbild wird sofort klar, dass so eine Konstruktion eine Eigenresonanzfrequenz f_r hat, und zwar, wenn sich die imaginären Anteile der Impedanz Z_C kompensieren:

$$Z_C = \text{ESR} + j(\omega L - 1/(\omega C)) \quad (2)$$

$$\omega L = 1/\omega C \quad (3)$$

$$r = 1/(2\pi \text{sq}(\text{LC})) \quad (4)$$

Bei Frequenzen unterhalb der Resonanz verhält sich das Bauteil als Kondensator, oberhalb der Eigenresonanz wird daraus eine Induktivität. Bei üblichen, zur Entkopplung verwendeten keramischen Kondensatoren, liegt die Eigenresonanz im Bereich zwischen etwa 1 MHz und 10 MHz. Der eingangs erwähnte Wert von 50 MHz für die Frequenz

der von einem üblichen DC/DC-Wandler generierten Störspannungen, liegt deutlich über dem typischen Wert der Eigenresonanzfrequenz. So könnte aus der Sicht der Entkopplung zwischen „High Speed“ und „traditionell“ unterschieden werden. Alle Störungen, deren Spektrum oberhalb der Eigenresonanz der eingesetzten Bauteile liegt, sind „High Speed“ oder hochfrequent im Sinne der Entkopplung. Damit wird auch der harmlose Wandler plötzlich zum High-Speed-Bauteil und Mittel zu seiner Entstörung sind nach diesen Gesichtspunkten zu wählen.

Wird nur die Formel der Eigenresonanzfrequenz betrachtet, liegt der Gedanke nahe, die Wirksamkeit der Entkoppelkondensatoren zu höheren Frequenzen hin zu verschieben, indem kleinere Kapazitätswerte ausgewählt werden. Beim Blick auf die Resonanzfrequenz scheint dies plausibel, und entsprechende Empfehlungen sind bekannt. Aber bei Betrachtung des gesamten Verlaufs der Impedanz über der Frequenz wird schnell deutlich: Mit dieser Methode wird nur Effektivität verschenkt (Abb. 2). Die Empfehlung muss lauten: Bei kleinster Bauteilgröße oder Geometrie, die im Wesentlichen die ESL bestimmt, ist die größte verfügbare bzw. aus Kostenaspekten akzeptierbare Kapazität zu wählen.

Ein Verzicht auf Kapazität bringt keine Verbesserung der Wirksamkeit im Bereich der höheren Frequenzen (>10 MHz), die Impedanz wird dadurch nicht geringer. Unterhalb der Resonanzfrequenz, im kapazitiven Bereich, ist aufgrund der geringeren Kapazität die Impedanz höher, hier wird also Effektivität verschenkt (Abb. 3).

Auswahlkriterien

Natürlich gibt es auch spezielle Bauformen mit besonders geringer ESL, wie z.B. die auf den Längsseiten (Bauform 0612, 0508) metallisierten Kondensatoren von AVX, Murata und inzwischen auch von anderen Herstellern. Eigentlich nicht für die Entkopplung gedachte Durchführungskondensatoren in 4-Pol-Ausführung (AVX, Murata, Syfer etc.) eignen sich ebenfalls sehr gut durch ihre ausgeprägt kleine ESL von deutlich weniger als 1 nH. Preislich aber wohl nicht zu unterbieten sind simple 0603er Bauformen, die durchaus 0,7 nH erreichen können. Im Gegensatz zu den genannten speziellen Bauformen gibt es diese auch in der „billigen“ Y5V-Keramik und mit wesentlich höheren Kapazitätswerten (1 µF, Tayo Yuden). Billig bedeutet hier, nicht nur kaufmännisch günstig, sondern vor allem auch technologisch vorteilhaft.

Schluss mit alten Zöpfen

Die Erkenntnis ist eventuell etwas gewöhnungsbedürftig, aber man entkoppelt im „Hochfrequenzbereich“ (>10 MHz) mit Induktivitäten. Der kapazitive Anteil ist nur noch eine angenehme Beigabe zur Gleichstromblockung. Das heißt dann, konsequent weitergedacht, Entkoppelkondensatoren sind nach ihren parasitären Elementen ESR und vor allem ESL auszusuchen. Und beide Werte sollen möglichst gering sein. Leider werden diese Werte aber in den Datenblättern nur selten angegeben. Dann hilft es nur, beim Lieferanten bzw. Hersteller nachzufragen. Manch-

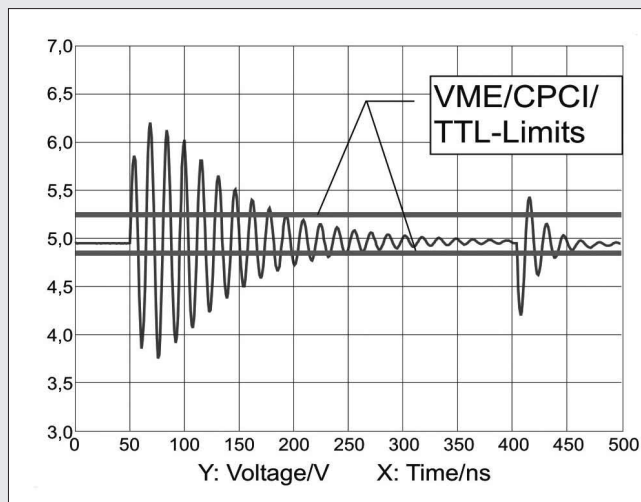


Abb. 4:
Schwingungen auf der Versorgungsspannung einer Backplane (Marktprodukt) durch nicht angepasste Kondensatoren. Sie bilden nicht ausreichend gedämpfte Parallelschwingkreise. Die Spannungsspitzen überschreiten die zulässigen TTL/VME/CPCI-Grenzwerte weit, ein Netzteil schaltete sich schlagartig ab (Überspannungsschutz)

mal sind sogar Spice-Modelle oder S-Parameter erhältlich, was sicherlich für Simulationen sehr hilfreich ist.

Wird dieser Gedanke noch weiter fortgeführt, wird auch schnell klar, dass der Temperaturkoeffizient des Kondensators (Kapazität) kein Entscheidungskriterium ist. Der ESR ist nur wenig von der Temperatur abhängig und die Bauteilinduktivität (ESL), die ja im interessierenden (Hoch-) Frequenzbereich der wesentliche und bestimmende Faktor für die Entkopplung ist, wird von der Temperatur ebenfalls nicht beeinflusst. Die ESL ist rein von der Geometrie und Stromführung im Kondensator abhängig.

Welche Rolle spielt nun der Ersatz-Serien-Widerstand? Wird nur das Diagramm des Impedanzverlaufs über der Frequenz betrachtet, so könnte man den Schluss ziehen, dass der ESR ebenfalls so gering wie möglich sein sollte. Werden jedoch mehrere unterschiedliche Kondensatoren parallelgeschaltet, was sicherlich in den meisten Fällen die Regel ist, bilden sich Parallelresonanzkreise. Diese lassen sich nicht vermeiden, im Extremfall bildet sich ein Resonanzkreis aus nur einem Kondensator und der Innenlagenkapazität der Leiterplatte. Und da wohl niemand, der schnelle Logikbausteine einsetzt, mehr auf eine flächige Verteilung der Versorgungsspannung verzichten kann, hat man immer mit dem Damoklesschwert Parallelresonanz zu leben.

Serienresonanzen als Damoklesschwert?

Beide Kondensatoren, oder Gruppen zweier unterschiedlicher Kondensatoren, haben Serienresonanzfrequenzen, die nicht gleich sind, weil entweder die Kapazität oder die

ESL (andere Bauform, Typ, etc.) unterschiedlich sind. Im Bereich unterhalb der tieferen Resonanzfrequenz wirken beide Kondensatoren noch als Kondensator. Im Bereich oberhalb der höheren Resonanzfrequenz erscheinen beide Kondensatoren nur noch als Induktivität, ωL ist jeweils größer als $1/\omega C$. Im Frequenzbereich zwischen diesen beiden Resonanzfrequenzen wirkt aber ein Kondensator noch kapazitiv und der andere induktiv und beide bilden einen Parallelresonanzkreis. Parallelschwingkreise weisen im Resonanzfall eine deutlich höhere Impedanz auf, als die Impedanz beider Pfade jeweils allein. Das bedeutet für die Praxis, dass in diesem Frequenzbereich die Entkopplung deutlich schlechter bzw. gar nicht vorhanden ist und Störungen sich ungehindert auf der Leiterplatte ausbreiten können. Es wurde ein Fall im Labor beobachtet, bei dem sich das Netzteil im (Parallel-) Resonanzfall wegen Überspannungen auf der +5-V-Leitung abschaltete. Die (VME-) Busplatine wurde über ein I/O-Board mit entsprechenden Frequenz angeregt (Abb. 4). In der Praxis könnte das dramatische Auswirkungen haben.

Man steuert eine Maschine oder einen Prozess und durch Rückmeldungen aus dem Prozess, die zufällig diese Parallelresonanz treffen, schaltet sich die Steuerung schlagartig ab oder gerät außer Kontrolle. Der ESR sollte daher gering, möglichst deutlich unter 100 mOhm sein, aber eben nicht zu gering, um die Resonanz noch ausreichend zu dämpfen.

Eine Simulation der Baugruppe hinsichtlich Parallelresonanzen oder zumindest ein Test vor der Freigabe ist sehr zu empfehlen. Natürlich ist es auch sinnvoll, die Eigenresonanzen der verwendeten Kondensatoren nicht zu weit auf der Frequenzskala auseinander zu legen.

Neben den bisherigen Schlussfolgerungen, Entkoppelkondensatoren nach ihren parasitären Elementen ESR und ESL, die leider in keinem Datenblatt erscheinen, auszuwählen, sei noch ein weiterer Aspekt angesprochen. Wenn es dann gelungen ist, Kondensatoren bei akzeptablen Kosten mit einer ESL von unter 1 nH zu finden, werden sie auf SMD-Pads gelötet, die mit einer langen Leiterbahn zu einem Via verbunden sind. Was der Layouter hier macht, ist etwa genauso, als würde man bei einem Sportwagen die Gänge 2 bis 6 ausbauen. Zur Induktivität des Bauteils (ESL) ist immer die Induktivität des gesamten Entstörkreises, in dem der Strom fließt, hinzuzurechnen. Durch das nicht angepasste Layout geht ein großer Teil der Performance verloren und es macht wenig Sinn, über eine weitere Verringerung des ESL zu diskutieren, die gegenüber der Bauform 0603 mit speziellen Konstruktionen (AVX, Murata, Syfer) noch erreicht werden kann.

Zusammenfassung

Weniger die Taktrate selbst als die Flankenteilheit der Signale bestimmen das Störspektrum. So können auch vermeintlich langsame Schaltungen erhebliche Störungen aussenden. Dieses Störspektrum reicht in der Regel weit in den Frequenzbereich hinein, der oberhalb der Eigenresonanzfrequenz üblicher Kondensatoren liegt. Die Dämpfungscharakteristik des Kondensators wird hier nur noch durch seine Induktivität (ESL) bestimmt. Da diese nicht temperaturabhängig ist, spielt der Temperaturkoeffizient des Dielektrikums keine Rolle und die Keramik (Z5U, X7R, etc.) kann einzig nach dem ESR, dem Ersatz-Serien-Widerstand, ausgewählt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein zu geringer ESR, wie er z.B. schon mit X7R-Keramiken erreicht wird, nicht mehr ausreicht, um Schwingungen von Parallelresonanzkreisen effektiv zu dämpfen. Letztlich muss das Layout ebenfalls auf eine möglichst geringe Induktivität des Entstörkreises ausgelegt werden.

Die effektive Dämpfung hochfrequenter Störungen möglichst nahe an der Quelle ist eine sehr wirksame und kostengünstige Maßnahme, um spätere Probleme mit der EMV der Baugruppe oder des Systems zu vermeiden. Richtig ausgewählte Kondensatoren sind nicht unbedingt teurer als andere und ein gutes Layout kostet in der Serie, wenn der Film auf das Kupfer kopiert wird, im Gegensatz zu teuren Filtern, nichts.

Beitrag als PDF auf www.duv24.net

more @ click DV4B0710 >