

APPLICATION NOTE

ANP098 | Auswirkung von Layout, Vias und Bauform auf die Abblockqualität von Filterkondensatoren

Andreas Nadler



01. EINLEITUNG

In der allgemein bekannten Fachliteratur lässt sich viel über korrekte PCB-Layout-Techniken, mehrstufige Filter & Abblockkondensatoren für Versorgungspins von digitalen ICs nachschlagen. Allerdings fehlen hierzu oftmals reale Messungen oder praxisnahe Simulationen. Ziel dieser AppNote ist es zu zeigen, welchen Einfluss die MLCC-Bauform, die Anzahl der Masse-Vias und die Platzierung der Filter-Bauteile zueinander haben. Zudem soll gezeigt werden, dass eine unglückliche Dimensionierung von Kondensatorbänken mehr Probleme verursachen kann als zunächst erwartet.

Abblockkondensatoren an Versorgungspins haben grundsätzlich die Aufgabe, die getaktete Stromschleife der digitalen Schaltkreise mithilfe einer niedrigen Impedanz lokal auf kürzestem Weg zu schließen. Dadurch werden die abgestrahlte magnetische Feldstärke und die in die Versorgungsspannungsebene eingekoppelten HF-Störströme bestmöglich reduziert. Werden die Kondensatoren hinsichtlich deren Impedanzkurve optimal gewählt und geometrisch optimal an den V_{CC} -Pins platziert, dann kann der getaktete HF-Strom bestmöglich abgeblockt werden.

Um die verschiedenen Einflüsse in der Praxis zu zeigen, wurde mithilfe einer vierlagigen Platine, welche exakt auf eine Impedanz von $50\ \Omega$ ausgelegt ist, die Einfügedämpfung S_{21} über einen weiten Frequenzbereich von 300 kHz bis 3 GHz ermittelt. Zudem wurden mit der Freeware LT-Spice und dem Profi Tool EMCoS zwei unterstützende Simulationen erstellt. Dadurch sollte ermittelt werden, wie nahe man an die reale Messung mittels E5071C (ENA RF Network Analyzer) anknüpfen kann und welchen Einfluss die Via-Positionierung relativ zueinander hat. Als HF-Steckverbinder wurden die MMCX-Typen der Würth Elektronik eiCan ausgewählt.

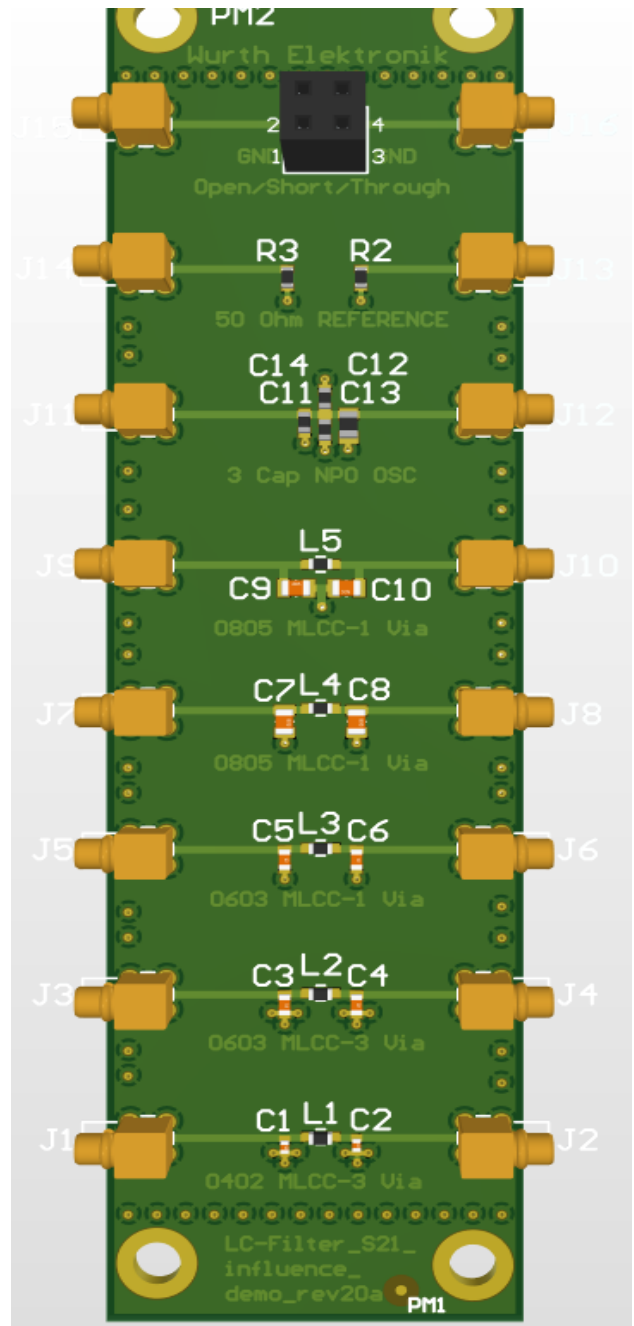


Abbildung 1: 3D-Ansicht der Demoplatine mit den verschiedenen $50\ \Omega$ -Messkanälen. Die obersten beiden Kanäle dienen zur Kalibrierung des Messaufbaus

APPLICATION NOTE

ANP098 | Auswirkung von Layout, Vias und Bauform auf die Abblockqualität von Filterkondensatoren

02. SCHALTPLAN UND MESSAUFBAU

Die Demoplatine in Abbildung 1 verfügt über 6 Messkanäle. Der Schaltplan zur Demoplatine ist in Abbildung 2 gezeigt, der Messaufbau mit Netzwerkanalysator in Abbildung 3. Die zwei obersten Kanäle dienen der Kalibrierung des Messaufbaus. Der dritte Kanal ist für die Messung der Oszillation vorgesehen, welche auftritt, wenn man mehrere MLCCs parallel schaltet. Zudem soll verglichen werden, inwiefern Klasse 1 NP0/COG sich von Klasse 2 X5R/X7R-Keramik bei ansonsten identischen Bauteilwerten unterscheidet. In den restlichen fünf Kanälen werden immer der gleiche 0603 HF-SMT-Ferrit 742863122 und je zwei MLCCs X7R mit 100 nF verwendet. Unterschiede finden sich jedoch in der Anzahl der GND-Vias, der Bauform und in der geometrischen Anordnung der MLCCs.

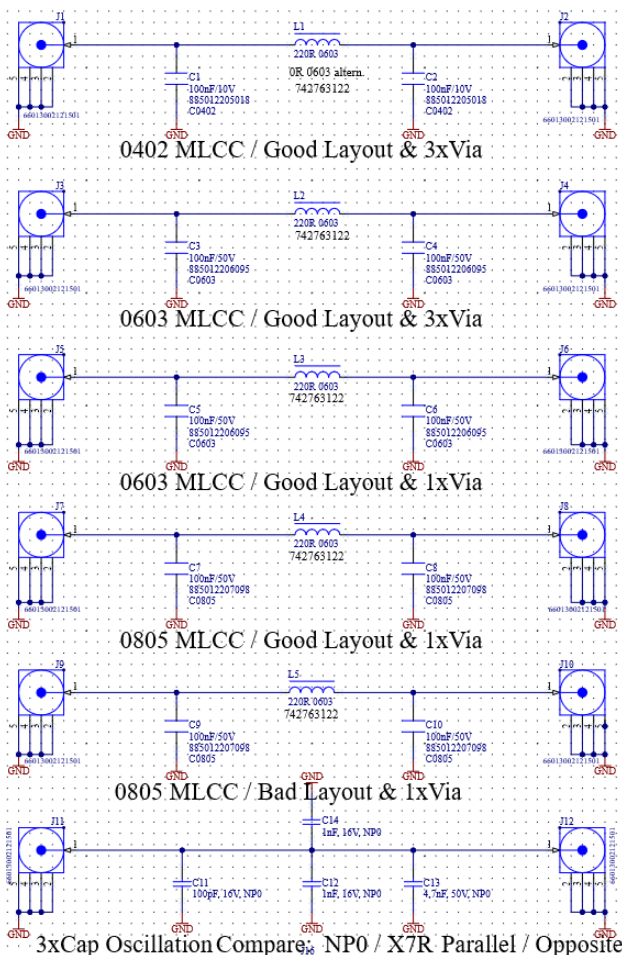


Abbildung 2: Altium-Schaltplan der Demoplatine mit den verschiedenen 50-Ω-Messkanälen (ohne Kalibrierkanäle)

Grundsätzlich gilt: Je höher und breitbandiger die Einfügedämpfung S_{21} ist, desto besser wirkt der gesamte Filter und/oder der einzelne Abblockkondensator.

Da in allen 6 Messkanälen überall der gleiche Ferrit und je zwei MLCCs mit 100 nF platziert sind, hängt die Einfügedämpfung in den Messungen ab von:

1. Bauform der MLCCs (vor allem deren ESL)
2. Anzahl der Vias nach GND (mehr Vias = geringere parasitäre Induktivität gegen GND)
3. Anordnung der MLCCs zum Ferrit (parasitäre induktive & kapazitive Kopplung)
4. Länge der Anschlussleiterbahnen zu den MLCC-Pads (summiert sich zusätzlich zum ESL des MLCC)

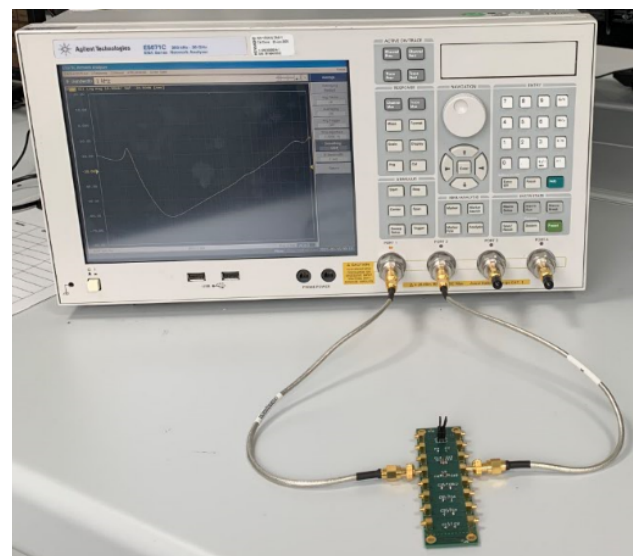


Abbildung 3: Messaufbau mit E5071C (ENA RF Network Analyzer) und MMCX-HF-Steckverbindern

03. LAYOUT IM DETAIL

Im Vorfeld wird von den kleinsten MLCC-Bauformen, 0403, mit drei Vias pro GND-Pad das beste Ergebnis erwartet, da deren äquivalente Serieninduktivität (ESL) am kleinsten ist (Abbildung 4).



Abbildung 4: Messkanal mit 0403 MLCC und je drei Vias am GND-Pad

Von den größten MLCC-Bauformen, 0805 mit nur einem Via pro GND-Pad wird eine deutlich schlechtere Einfügedämpfung oberhalb der Resonanzfrequenz erwartet (Abbildung 5).



Abbildung 5: Messkanal mit 0805-MLCC und je einer Via am GND-Pad

APPLICATION NOTE

ANP098 | Auswirkung von Layout, Vias und Bauform auf die Abblockqualität von Filterkondensatoren

Das schlechteste Ergebnis wird von dem Messkanal mit den 0805-MLCCs in Kombination mit dem mangelhaften Layout erwartet (Abbildung 6). Hierbei wurde nur eine einzige GND-Via für beide MLCC-GND-Pads eingebaut. Zudem sind die MLCCs parallel zum Ferrit angeordnet, was zu parasitären induktiven und kapazitiven Kopplungen führt. Des Weiteren sind die Leiterbahnanlüsse der MLCC-Pads unnötig lang ausgeführt. 1-2 mm Länge entsprechen ca. 0,5 nH zusätzlichem ESL. In Abbildung 7 sind die parasitären Impedanzen, die durch den Aufbau und das Layout entstehen, verdeutlicht.



Abbildung 6: Messkanal mit 0805-MLCC, nur eine Via für beide GND-Pads, unnötige Stichleitungen und geometrisch ungünstige Anordnung gegenüber dem Ferrit



Abbildung 7: Parasitäre Induktivitäten und Kapazitäten des schlechten Layouts, welche die Einfügedämpfung des Filters reduzieren

Für die Messkanäle mit den Kondensatoren der 0603-Bauformen werden Ergebnisse erwartet, welche zwischen den 0402- und 0805-Typen liegen.

Zusätzlich wurde noch ein Messkanal entworfen, mit dem sich die Auswirkungen mehrerer parallel geschalteter MLCC-Kondensatoren aus Klasse 1 Keramik (NPO/COG) mit unterschiedlichen Kapazitäten untersuchen lassen. In diesem Vergleich wurden je ein 100 pF, 1 nF und ein 4,7 nF ausgewählt. Da es sich um Kondensatoren mit besonders hoher Güte handelt, bei denen das Dielektrikum aus Titanoxid besteht, werden ungünstige Resonanzen zwischen den verschiedenen kapazitiven und induktiven Elementen der Kondensatoren erwartet. Diese Resonanzen würden die Einfügedämpfung S_{21} in bestimmten Frequenzbereichen stark reduzieren. Der gleiche Versuch wurde zudem mit MLCCs mit Klasse-2-Keramik (X7R) durchgeführt. X7R-Keramik besteht aus Bariumtitanat. Da diese Keramik stärker verlustbehaftet

ist als Klasse-1-Keramik, und somit eine etwas schlechtere Güte, d.h. einen größeren Verlustwinkel $\tan \delta$ bietet, wird eine geringer ausgeprägte Resonanzamplitude erwartet. Der Aufbau des Layouts ist in Abbildung 8 gezeigt.



Abbildung 8: Messkanal mit drei verschiedenen Kapazitätswerten, aber gleichem Dielektrikum. Der vierte MLCC zwischen den Beschriftungen, wurde bei den Tests nicht bestückt.

04. LT SPICE & EMCOS SIMULATION

Würth Elektronik stellt schon seit vielen Jahren für die meisten der passiven Bauelemente eine breite Auswahl an passenden LTSpice-Modellen zur Verfügung. Diese können jederzeit problemlos von der WE-Website heruntergeladen werden. Werden im LTSpice die Modelle um die Vias und deren parasitäre Eigenschaften ergänzt, kann man relativ genau die Kurvenformen der realen S_{21} -Messung nachbilden (Abbildung 11). Das betrifft aber nur die relative und nicht die absolute Einfügedämpfung. Die parasitäre Induktivität und parallele Kapazität der Vias hängt von deren Länge und Innendurchmesser ab. Zudem beeinflussen sich die Vias auch noch gegenseitig durch eine Gegeninduktivität, welche vor allem vom Abstand der Vias zueinander abhängt. Je weiter die Vias mit gleichem elektrischen Potential voneinander entfernt sind, desto kleiner ist deren Gegeninduktivität und damit auch die Gesamtinduktivität.

Mit der kostenpflichtigen EMCOS-Software wurde ebenfalls eine unterstützende Simulation durchgeführt. Diese Software muss u.a. mit den genauen PCB-Rohdaten aus dem CAD (z.B. Altium) gespeist werden. Mithilfe der EMCOS-Software wurde untersucht, wie sich eine unterschiedliche Positionierung der drei GND-Vias auswirkt. In der Theorie wird erwartet, dass Vias mit gleichem elektrischen Potential eine Gegeninduktivität zueinander ausbilden und somit die Gesamtinduktivität ansteigt, je näher diese zueinander platziert sind. Platziert man die Vias im 90°-Winkel um das GND-Pad der MLCCs herum, kann man diese kurz mit dem Pad verbinden und trotzdem ergibt sich so ein großer Abstand der drei Vias zueinander.

APPLICATION NOTE

ANP098 | Auswirkung von Layout, Vias und Bauform auf die Abblockqualität von Filterkondensatoren

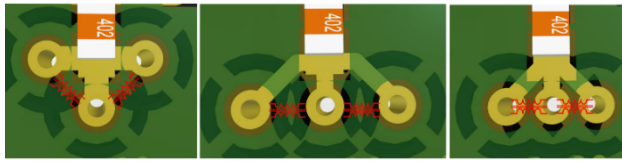


Abbildung 9: Mögliche Varianten der GND-Via-Positionierung. In rot dargestellt die gegenseitige Beeinflussung durch die Gegeninduktivität. Je weiter entfernt die Vias mit gleichem elektrischen Potential sind, desto kleiner ist die Gegeninduktivität

05. SIMULATIONS- & MESSERGEBNISSE

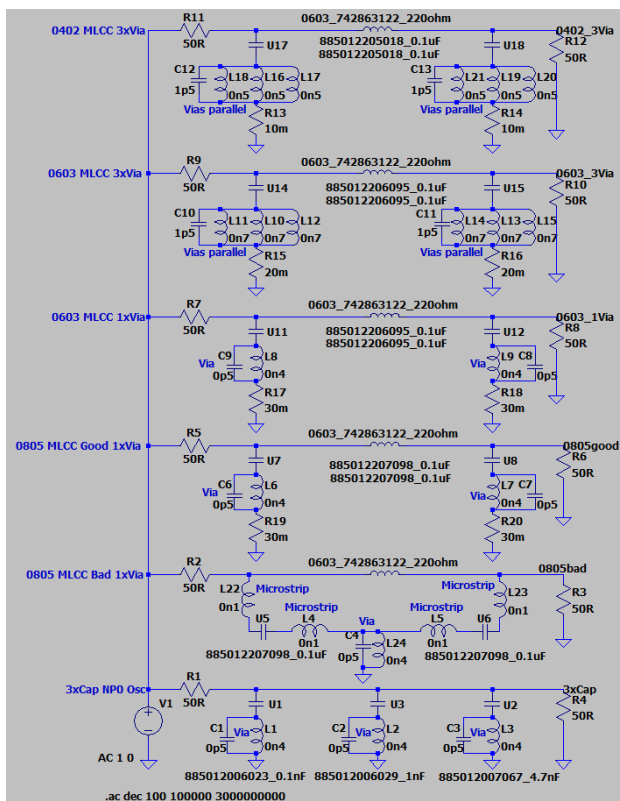


Abbildung 10: Schaltplan LTSpice Simulation. Die Vias wurden mithilfe von Induktivitäten und Kapazitäten nachmodelliert

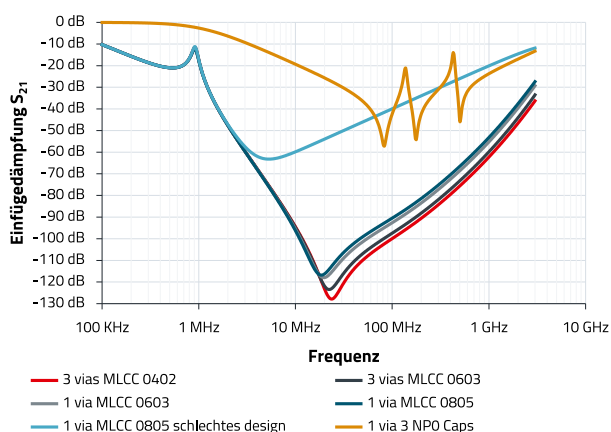


Abbildung 11: LTSpice Simulationsergebnis Einfügedämpfung S_{21}

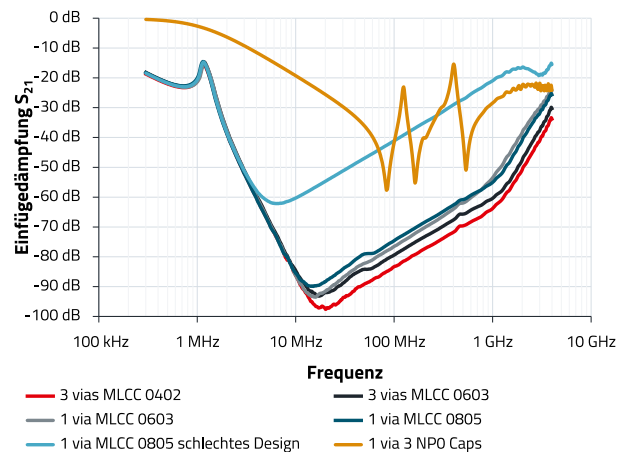


Abbildung 12: Messergebnisse der Einfügedämpfung S_{21} mit E5071C (ENA RF Network Analyzer)

Wie im Vorfeld erwartet, liefert die kleinste Bauform (0402) in Kombination mit mehreren Vias pro GND-Pad das beste Ergebnis aufgrund des kleinsten ESL. Die Einfügedämpfung des schlechten Layout-Beispiels fällt eklatant schlechter aus, als der Rest. Je nach Messpunkt treten in der Messung über 40dB Unterschied zum nächstbesten Kanal auf. Werden die grundlegenden Layout-Regeln wie, 90°-Anordnung der MLCCs zum Ferrit und kurze Pad-Anbindung zu Vias als auch Leiterbahnen eingehalten, so lässt sich erfolgreich ein breitbandiges Filter designen. Die Unterschiede in der Einfügedämpfung betragen dann nur noch max. 10 dB je nach Bauform und Via-Anzahl.

Die relativ einfache LTSpice Simulation kann die grundlegenden Eigenschaften der verschiedenen Messkanäle ebenfalls schön darstellen, wenn auch nicht zu 100 %. Die vielen parasitären Eigenschaften von Stecker, PCB etc. lassen sich im LTSpice nicht ohne weiteres abbilden.

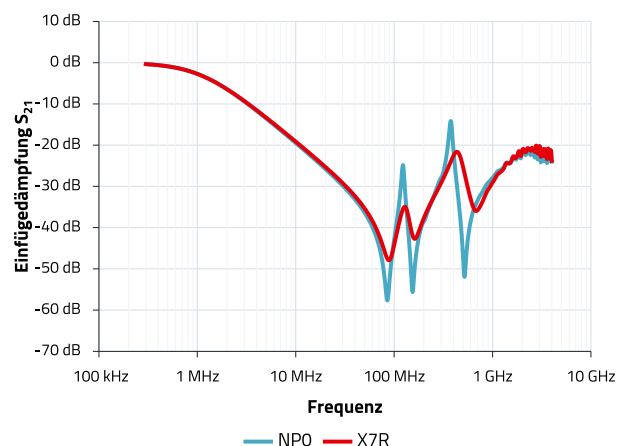


Abbildung 13: Vergleichsmessung der Einfügedämpfung von Kondensatorengruppen mit Klasse 1 (NPO/COG blau) und Klasse 2 (X5R/X7R rot) Keramik mit E5071C (ENA RF Network Analyzer)

APPLICATION NOTE

ANP098 | Auswirkung von Layout, Vias und Bauform auf die Abblockqualität von Filterkondensatoren

Bei der Vergleichsmessung der drei MLCCs in NPO und X7R lässt sich der Unterschied bei der Güte ebenfalls praxisnah darstellen. Die NPO erreichen zwar bei den einzelnen Resonanzfrequenzen bessere Werte in der Einfügedämpfung, jedoch fallen auch die Ausschläge der Amplitude in negativer Form höher aus. Die NPO-MLCCs erzeugen einen LC-Schwingkreis mit höherer Güte, welcher in bestimmten Frequenzregionen Gefahren einer ungewollten Verstärkung von Störanteilen mit sich bringt.

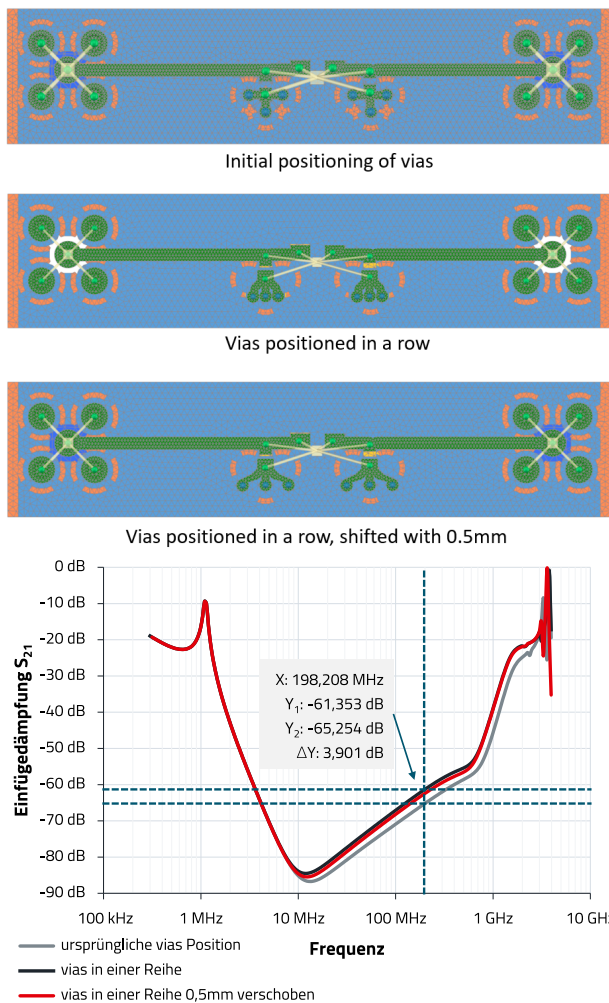


Abbildung 14: EMCoS-Simulation des 0403-Messkanals mit unterschiedlichen Positionen der GND-Vias. Durch die 90°-Anordnung um das Pad ergeben sich in diesem Fall bis zu 4 dB mehr Dämpfung, als wenn die Vias sehr nahe beieinander angeordnet sind. Werden die Vias in einer Reihe mit 0,5 mm Abstand platziert, dann liegt die Kurve der Einfügedämpfung ungefähr dazwischen.

06. ZUSAMMENFASSUNG

Anhand der gezeigten Unterschiede ist ersichtlich, dass dieser PI-Filter nur dann optimal wirken kann, wenn die Layout-Regeln nach Lehrbuch beachtet werden. Es ergeben sich Unterschiede von über 40 dB, je nach Frequenz in der Einfügedämpfung, was in der Praxis den Unterschied zwischen Erfolg und Misserfolg in der EMV-Messung bedeuten kann. Was in dieser Application Note nicht berücksichtigt worden ist, sind die Spannungsabhängigkeit der Klasse -2-MLCCs und die DC-Stromabhängigkeit des Multilayer-Ferrits. Diese Einflussfaktoren bedeuten in der Praxis weitere Differenzen in der Einfügedämpfung. Wenn man erfolgreich Versorgungspins an digitalen ICs abblocken möchte, ist es zu empfehlen, mehrere Vias pro GND-Pad an den Kondensatoren zu vorzusehen. Zudem zeigt sich, dass auch sehr kurze Stichleitungen zu den Kondensatoren und eine geometrisch ungünstige Anordnung die Abblockqualität deutlich verschlechtern. Der Ferrit und die Kondensatoren sollten im 90°-Winkel zueinander angeordnet sein, um unerwünschte Kopplungen zu vermeiden. Mithilfe der EMCoS-Simulation konnte gezeigt werden, dass man GND-Vias möglichst weit entfernt zueinander, jedoch immer nahe am MLCC-Pad platzieren sollte. Dadurch lassen sich im höheren Frequenzbereich noch ein paar dB Dämpfung erzielen. Das beste Ergebnis erzielte hier die Variante, in der die Vias 90° um das GND-Pad und mit geringem Abstand (max. 0,3 mm) zum Pad angeordnet waren.

Anhand der breitbandigen Einfügedämpfung ohne unerwünschte Oszillationen, lässt sich zudem erkennen, welche enormen Vorteile Multilayer-Ferrit gegenüber reinen Kondensatorgruppen bieten. Möchte man trotzdem mehrere Kondensatoren in einer Gruppe zusammenschalten, so sollte diese Gruppe einen Kondensator der Klasse 2 (Keramik z.B. X7R) beinhalten, um die entstehenden Oszillationen in der Amplitude zu begrenzen. Eine ausreichend hohe Einfügedämpfung ist jedoch nur mit einem zusätzlichen Multilayer-Ferrit zu erreichen.

APPLICATION NOTE

ANP098 | Auswirkung von Layout, Vias und Bauform auf die Abblockqualität von Filterkondensatoren

A. Anhang

A.1 Formeln

Berechnung der parasitären Via-Induktivität und Kapazität:

$$L_{nH} = k_L \cdot h \cdot \left[1 + \ln \left(\frac{4 \cdot h}{d} \right) \right] \quad (1)$$

$$C_{pF} = \frac{k_C \cdot \epsilon_r \cdot h \cdot d1}{d2 - d1} \quad (2)$$

k_L = 0,2 nH/mm PCB-Induktivität pro Längeneinheit

k_C = 0,056 pF/mm PCB-Kapazität pro Längeneinheit

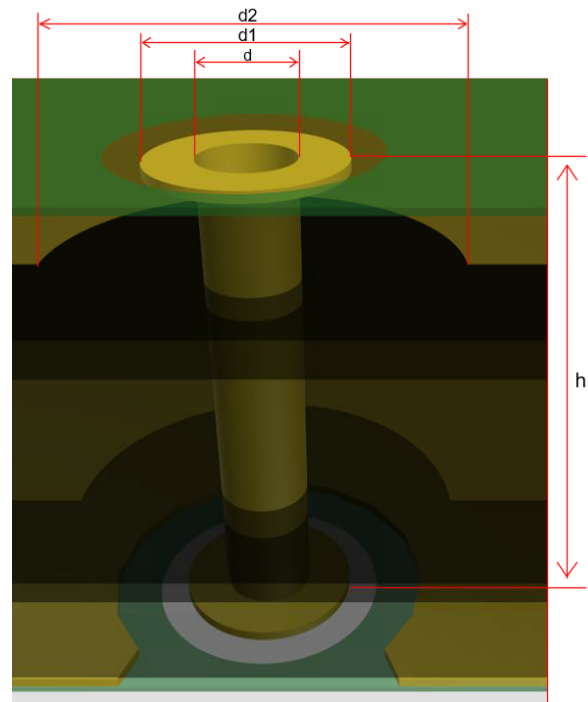
h = Länge der Via

d = Innendurchmesser der Via

d_1 = Via-Pad-Außendurchmesser

d_2 = Außendurchmesser Via-Freistellungs-Innenlagen

ϵ_r = Dielektrische Materialkonstante (FR4 = 4,5)



A.2 Stückliste/BOM

Index	Beschreibung	Wert	Baugröße	Art.Nr.
J1-J16	HF-Steckverbinder	DC-6GHz	MMCX Right Angle	66013002121501
L1-L5	WE-CBF HF-Ferrit	220R@100MHz	0603	742863122
C1,C2	WCAP-CSGP	100nF 10V X7R	0402	885012205018
C3-C6	WCAP-CSGP	100nF 50V X7R	0603	885012206095
C9, C10	WCAP-CSGP	100nF 50V X7R	0805	885012207098
C11	WCAP-CSGP	100pF 16V NP0	0603	885012006023
C12	WCAP-CSGP	1nF 16V NP0	0603	885012006029
C13	WCAP-CSGP	4,7nF 10V NP0	0805	885012007009
J17	WR-PHD	4 Poles Socket Header	THT 2,54mm	61300421821

APPLICATION NOTE

ANP098 | Auswirkung von Layout, Vias und Bauform auf die Abblockqualität von Filterkondensatoren

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 Todesfällen 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.de/app-notes



REDEXPERT Design Plattform
www.we-online.de/redexpert



Toolbox
www.we-online.de/toolbox



Produkt Katalog
www.we-online.de/produkte

KONTAKTINFORMATION

appnotes@we-online.de
Tel. +49 7942 945 - 0



Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG
Max-Eyth-Str. 1 · 74638 Waldenburg
Germany
www.we-online.de

