

Auswahlkriterien für den idealen MLCC für Hochleistungs-HF-Anwendungen

# Die Relativität von High-Q-Kondensatoren

*Geht es um die Auswahl des passenden High-Q-Kondensators, sind Spannungs-, Kapazitäts- und Toleranzwerte nur einige der Kriterien, die zu beachten sind. Nur weil ein Kondensator mit »High-Q« gekennzeichnet ist, bedeutet das nicht unbedingt, dass er auch die erforderliche Leistung bringt.*

VON SCOTT HORTON,  
JOHANSON TECHNOLOGY, UND  
FALKO LADIGES, WDI



**O**bwohl viele High-Q-Kondensatoren auf dem Markt erhältlich sind, kann ihre Leistung je nach Design und Fertigungsqualität stark variieren. Für viele Hochleistungs-HF-Anwendungen ist der »Q-Faktor« von Mehrschicht-Kondensatoren (MLCC) eine der wichtigsten Eigenschaften beim Entwurf von Schaltungen für hochwertige Produkte von MRT-Spulen bis hin zu Industrieelektronik.

Oft als mathematische Formel ausgedrückt, stellt der Q-Faktor die Effizienz eines bestimmten Kondensators in Bezug auf seine Energieverlustrate dar. Theoretisch würde ein perfekter Kondensator keinen Verlust aufweisen und einen vollen Energietransfer entladen, doch in der Realität wird er immer einen ge-

wissen Verlust aufweisen. Je höher dieser Energieverlust ist, desto mehr Wärme wird im Kondensator erzeugt, die abgeleitet oder gekühlt werden muss.

Für Anwendungen mit geringer Leistung ist diese Wärme unbedeutend. Bei Anwendungen mit höherer Leistung können heißlaufende Kondensatoren jedoch benachbarte Bauteile beschädigen und im Extremfall Teile der Leiterplatte ablösen. Da die Energieverluste bei höheren Frequenzen erheblich zunehmen können, führt das selbst bei Schaltungen mit geringer Leistung zu anderen Leistungsproblemen. Eine geringere Empfängerempfindlichkeit und ein geringeres Link-Budget können manchmal mit verlustreicheren Kondensatoren in Verbindung gebracht werden.

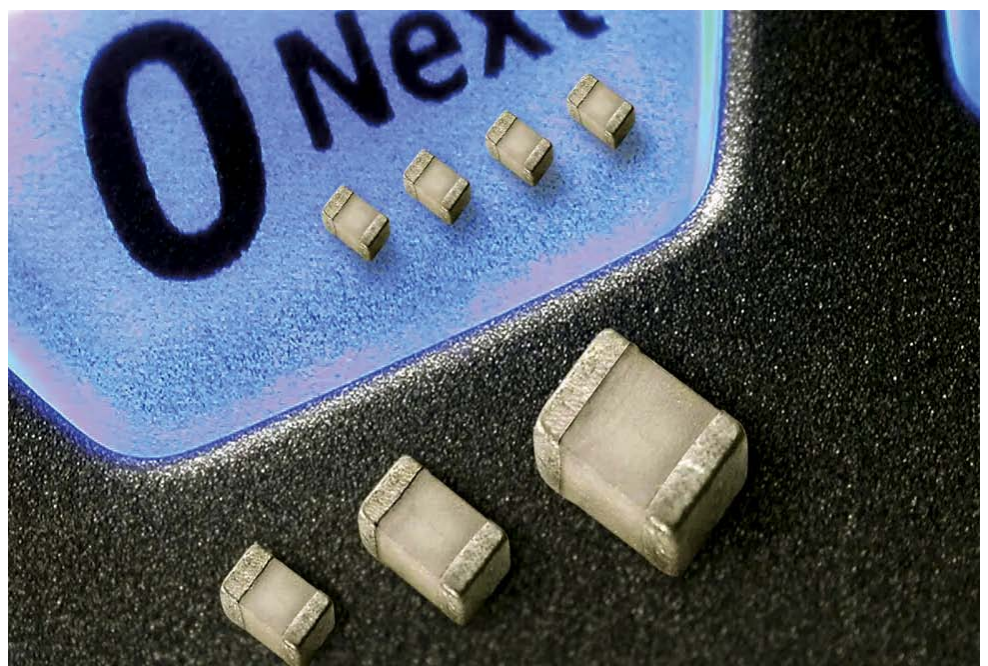


Bild 1: High-Q-Mehrschichtkondensatoren von Johanson Technology

Bilder: WDI

Aus diesem Grund werden für Hochleistungs-HF-Anwendungen in der Regel High-Q-Kondensatoren benötigt, die sich durch einen extrem niedrigen äquivalenten Serienwiderstand (ESR) auszeichnen. High-Q-Kondensatoren minimieren nicht nur den Energieverlust, sondern reduzieren auch das durch den ESR verursachte thermische Rauschen und tragen so zur Aufrechterhaltung des gewünschten Signal-Rausch-Verhältnisses bei.

Doch nicht alle High-Q-Kondensatoren sind gleich. Es stellt sich heraus, dass High-Q-Kondensatoren weit davon entfernt sind, ein absolutes Kriterium zu sein, und dass ihre Leistung je nach Design, Herstellung, Qualitätskontrolle und sogar nach der Art der Leistungstests variieren kann.

Um die Sache noch komplizierter zu machen, verwenden die Hersteller zahlreiche Begriffe für ihre High-Q-Kondensatoren, darunter »High-Q«, »Ultra-High-Q«, »Low Loss« und »RF-Kondensatoren«. In vielerlei Hinsicht ist »High-Q« ein relativer Begriff. Dem Anschein nach bieten viele Kondensatorhersteller ein High-Q-Produkt an, aber die Leistung der Bauteile in der Schaltung kann sehr unterschiedlich sein.

Für die meisten MLCCs werden ESR-Leistungswerte angegeben, die jedoch mit einer gewissen Vorsicht zu betrachten sind. ESR-Tests, die in Laborumgebungen durchgeführt werden, werden meist mit einer von zwei Methoden ermittelt: mithilfe von Vektornetzwerkanalysatoren (VNAs) oder Resonanzleitungen. Einrichtung und Kalibrierung dieser Systeme begrenzen die Genauigkeit der Daten. Bei der Messung der Kondensatorgüte mit einem Netzwerkanalysator sind die Konfiguration und die Kalibrierung von entscheidender Bedeutung. Nicht alle Messungen mit VNAs sind gleichermaßen aussagekräftig. Schlecht kalibrierte VNAs können sogar sehr ungenaue Ergebnisse liefern. Eine zuverlässigere Methode zur Prüfung der Güte von Kondensatoren ist das bewährte Resonanzliniensystem. So ist die Boonton-34A-Resonanzlinie seit Jahrzehnten der De-facto-Standard in der Branche.

Viele Hersteller veröffentlichen die ESR-Leistungsdaten einer Boonton-34A-Resonanzleitung. Da diese Methode von der Frequenzgenauigkeit eines Signalgenerators und einer sehr stabilen Resonanzleitung abhängt, lassen sich Messungen mit extremer Präzision durchführen, die über einen längeren Zeitraum wiederholbar sind, sodass man diesen relativen Ergebnissen glauben kann.

### *Gleichbleibende Herstellung*

Ein weiterer Bereich, der den ESR eines High-Q-Kondensators beeinflussen kann, ist der Herstellungsprozess. Definitionsgemäß bestehen MLCCs-Kondensatoren aus laminierten Schichten speziell formulierter keramischer Dielektrika, die mit einem Metallelektroden-system durchsetzt sind. Der Schichtaufbau wird dann bei hoher Temperatur gebrannt, um ein gesintertes und volumetrisch effizientes kapazitives Bauelement herzustellen. An den freiliegenden Enden des Chips ist ein leitfähiges Abschlussbarriersystem integriert, um die Verbindung zu vervollständigen.

Bei mehrschichtigen Keramikkondensatoren (MLCC) wird die Kapazität in erster Linie durch drei Faktoren bestimmt: das  $k$  des keramischen Materials, die Dicke der dielektrischen Schichten sowie die Überlappungsfläche und die Anzahl der Elektroden. Ein Kondensator mit einer bestimmten Dielektrizitätskonstante kann also mehr Schichten und größere Abstände zwischen den Elektroden oder weniger

Schichten und engere Abstände aufweisen, um die gleiche Kapazität zu erreichen.

Eine signifikante Änderung der Lagenzahl bei MLC-Kondensatoren kann die Leistungsmerkmale erheblich verändern. Daher kontrollieren die führenden Kondensatorhersteller die Anzahl der Lagen bei jedem hergestellten Teil sehr genau. Leider ist dies in der Branche keine Selbstverständlichkeit, denn einige Anbieter liefern Produkte mit derselben Teilenummer, aber einer unterschiedlichen Anzahl von Lagen. Kurz gesagt: Ein und dieselbe Teilenummer kann sehr unterschiedliche Designs haben, die zu unerwünschten Impedanzänderungen im Kondensator führen. Wenn ein Hersteller die Anzahl der Lagen nicht genau kontrolliert, kann es sein, dass er in einer Charge 10-Lagen-Teile liefert und in einer späteren Charge 17-Lagen-Teile. Diese beiden Teile werden bei hohen Frequenzen nicht die gleiche Leistung erbringen.

Eine weitere Ursache für Leistungsschwankungen liegt darin, dass OEMs über Wiederverkäufer einkaufen, die von mehreren Fabri-

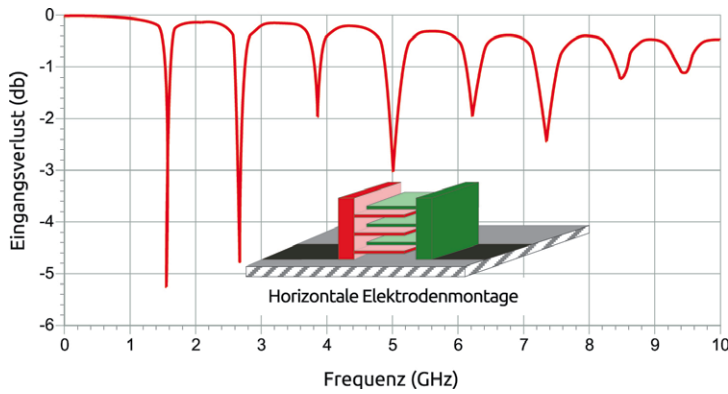


Bild 2: Parallele Resonanzfrequenzen (PRF) bei horizontaler Elektrodenmontage

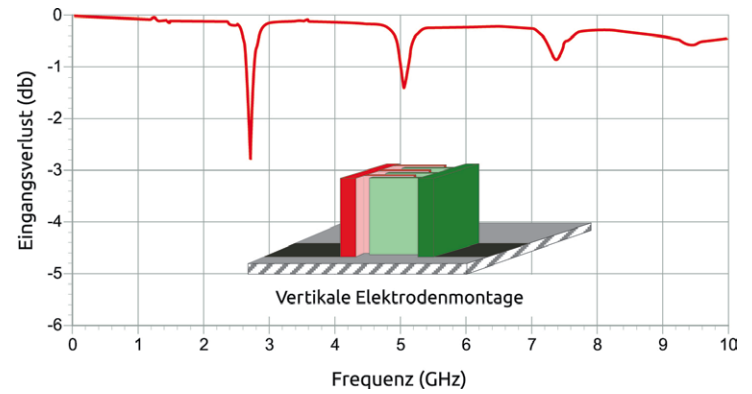


Bild 3: Vertikale Elektrodenmontage und die Eliminierung aller ungeraden parallelen Resonanzfrequenzen (PRF) einschließlich der ersten PRF

ken beziehen. In diesem Szenario haben die verschiedenen Fabriken unterschiedliche Designs, die eine unterschiedliche Hochfrequenzleistung aufweisen. Da die Artikel also von verschiedenen Herstellern bezogen werden, kann das zu erheblichen Schwankungen in der Hochfrequenzleistung führen – ein Szenario, in dem die Teile nicht gleichbleibend sind, was wiederum zu Schwankungen in der Systemleistung führt.

Zu den wichtigen Leistungskennzahlen zählt auch die Serienresonanzfrequenz (SRF), die durch unterschiedliche Lagenzahlen beeinflusst wird. Diese Schwankung kann sich negativ auf die Leistung von LC-HF-Filtern auswirken, in denen diese Kondensatoren verwendet werden. Bandpassfilter zum Beispiel nutzen oft die Resonanzfrequenzen des Kondensators, um seine Leistung zu formen. Das bedeutet, dass die Filter bei unterschiedlichen Lagenzahlen möglicherweise nicht wie vorgesehen funktionieren und die Strahlungsemissionen im fertigen Produkt die FCC- oder ETSI-Anforderungen nicht einhalten. Änderungen der Kondensatorleistung von Los zu Los können zu kostspieligen Produktrückrufen führen.

Kondensatoren mit hohen Verlusten können sich auch auf Aspekte wie die Batterielebensdauer auswirken. Bei Systemen, in denen HF-Verstärker verwendet werden, ist es ineffizient, wenn die Leistung von einem Kondensator absorbiert oder abgeleitet wird. Die Ingenieure müssen dann Verstärker einsetzen, um die durch Kondensatoren mit niedrigem Q-Wert verursachten Verluste auszugleichen, was zu einer schnelleren Entleerung der Batterie in Handheld-Geräten führt.

Kondensatoren mit hohem Q-Wert können auch die Empfindlichkeit des Empfängers verbessern, indem sie die Verluste zwischen der Antenne und dem Transceiver verringern.

### Unterschiede in Design und Konstruktion

High-Q-Kondensatoren unterscheiden sich von Standardkondensatoren im Design. Um die geringsten Verluste zu erzielen, versuchen Hersteller die verlustärmsten Dielektrika, Tinten und Elektrodenoptionen zu verwenden.

Kostengünstige Standardkondensatoren verwenden Nickelelektroden. Nickel ist jedoch ein schlechter Leiter und für hohe Verluste bei HF- und Mikrowellenfrequenzen bekannt.

Silber- und Kupferelektroden sind besser und leistungsfähiger als Nickel und werden für die meisten High-Q-Anwendungen verwendet. Diese Art von Elektroden hat den zusätzlichen Vorteil, dass sie kein Magnetfeld erzeugen wie Nickel.

Für HF-Anwendungen mit höchster Leistung bieten einige Hersteller reine Palladiumelektroden an. Silber ist jedoch im Vergleich zu Palladium bei höheren Frequenzen ein besserer Leiter.

Aus diesem Grund verwendet Johanson Technology, Hersteller von keramischen Mehrschicht-High-Q-Kondensatoren, Silberelektroden in seinen Ultra-High-Q-Produkten für niedrigsten ESR-Verlust in den Standardgrößen 1111, 2525 und 3838.

### Kondensatoren in vertikaler Ausrichtung

Selbst kleine Details wie die Ausrichtung des Kondensators in den Bandspulen können sich direkt auf die Leistung einer Schaltung auswirken. Traditionell sind High-Q-Kondensatoren hauptsächlich in einer horizontalen Elektrodenkonfiguration erhältlich. Inzwischen bieten einige führende Hersteller die MLCCs

sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Elektrodenanordnung an. Jedoch ist die Montage von Kondensatoren in einer vertikalen Konfiguration auch ein Trick der Industrie, der den nutzbaren Frequenzbereich der Kondensatoren effektiv erweitert (vgl. Bild 2 und Bild 3).

Zusätzlich zur SRF, die auf der gegebenen physikalischen Größe/Konstruktion und einem gegebenen Kapazitätswert basiert, weisen Kondensatoren auch parallele Resonanzfrequenzen (PRF) auf. Als Faustregel gilt, dass die PRF etwa doppelt so hoch ist wie die SRF. Bei der PRF wird die Übertragungsimpedanz relativ hoch, und der Kondensator ist bei dieser Frequenz sehr verlustreich. Wenn man den Kondensator stattdessen vertikal anbringt, werden die ungeraden PRFs eliminiert (zum Beispiel die 1., 3., 5. und so weiter). Dadurch wird die erste PRF deutlich nach oben verlagert, sodass der Kondensator bei deutlich höheren Frequenzen eingesetzt werden kann.

### Fazit

Wenn es um High-Q-Kondensatoren geht, erfordert die Auswahl des idealen MLCC mehr als eine Spannung, einen Kapazitätswert und eine Toleranz, wie in diesem Artikel gezeigt wurde. Ein Kondensator, nur weil er als »High-Q« gekennzeichnet ist, muss nicht unbedingt auch die erforderliche Leistung erbringen.

Diese Kondensatoren spielen eine entscheidende Rolle bei der HF-Übertragung und dem Empfang von militärischer, medizinischer und industrieller Elektronik; daher müssen sie die erwartete Leistung erbringen und so optimiert sein, dass Energieverluste und Abweichungen von einer Charge zur anderen minimiert werden. Ist dies nicht der Fall, kann es sein, dass die Elektronik im Einsatz nicht die erwartete Leistung bringt. (eg)