

Elektrische Charakteristiken von Chipkondensatoren

Dr. sc. nat. HANS-DIETER LANGER

Mitteilung aus der Sektion Physik/Elektronische Bauelemente der TU Karl-Marx-Stadt

In [1] wurde ein Überblick über Bauformen und geometrische Anforderungen an Chipkondensatoren gegeben. Entsprechend dem fortgeschrittenen Stand der Miniaturisierung muß sich der Anwender mehr als bei den bedrahteten Bauelementen mit den Entwurfsregeln und mit den Toleranzproblemen der Bestückung befassen.

Trotzdem bleiben natürlich die elektrischen Kennwerte der Chipkondensatoren die wichtigsten Einsatzkriterien. Im Vergleich zu den bedrahteten Kondensatoren ist auch heute noch das Spektrum der elektrischen Hauptparameter, wie Nennkapazität bzw. Nennspannung, der international verfügbaren Chipkondensatoren eher eingeschränkt (s. Bild 1 in [1]). Dabei muß man Leistungskondensatoren – außer keramischen Hochvoltchips sind bisher Leistungsbauelemente in Chipbauform nicht bekannt geworden – nicht einmal berücksichtigen.

Es hat sich in der Praxis jedoch gezeigt, daß dies kein prinzipieller Nachteil ist. Vielmehr haben es die Anwender schnell gelernt, mit den neuen Bauformen (SMD) und Verarbeitungstechnologien (SMT) Schaltungen zu entwickeln, die letztlich mehr spezialisierte bzw. komplexere Funktionen erfüllen als ihre konventionellen Vorgänger, denn geringere Bauelementeabmessungen, miniaturisierte Anschlußelemente und verkürzte Leiterbahnen bedeuten entschieden bessere HF- und Impulseignung. Die Bahnwiderstände, die Streukapazitäten und die parasitären Induktivitäten verringern sich in Größenordnungen, die schaltungstechnisch spürbar zu verwenden sind, um z. B. niedrigere Signallaufzeiten bzw. weniger verfälschte Signale zu erzielen. Die Entwicklung läuft über gemischt bestückte Leiterplatten eindeutig zur reinen beidseitigen Oberflächenmontage. Damit setzt sich ein geschlossenes neues Elektronikkonzept durch. International gibt es viele

Nachdem in einem früheren Beitrag Bauformen und geometrische Anforderungen an Chipkondensatoren diskutiert wurden, werden in diesem Beitrag die Auswirkungen der Materialien, der Dielektrika, auf das Verhalten der Bauelemente vorgestellt. Dabei wird besonders auf das Temperatur- und Frequenzverhalten eingegangen. Hinweise für den zweckmäßigen Einsatz der Chipkondensatoren sind für den Praktiker von Bedeutung.

Beispiele kompletter SMD-Systemlösungen, die diese Einschätzung rechtfertigen, man denke z. B. an die in Japan entwickelte Videotechnik oder an die Fortschritte in der Automobilelektronik.

Für die Leiterplattentechnik, die auch die Volkswirtschaft der DDR in großer Breite durchdringt, ist es wichtig zu wissen, daß die höher spezialisierte Hybridtechnik auf diesem Gebiet einen etwa 20jährigen Erfahrungsvorlauf besitzt, den es zu nutzen gilt.

Elektrische Kennwerte

Nennkapazität und -spannung

Für den Anwender sind zunächst einmal die Standardkennwerte von Bedeutung. In der Tafel 1 wurden die typischen Wertebereiche anhand einer umfassenden Analyse der verfügbaren internationalen Firmenliteratur zusammengetragen. Man bemerkt vor allem die vergleichsweise niedrigen Maximalnennkapazitäten, die in der Chipbauform bisher zur Verfügung stehen. Am auffälligsten sind die $22 \mu\text{F}$ bei Al-Elektrolytkondensatoren mit Flüssigelektrolyt, die sicher für die Hersteller eine Herausforderung darstellen, in naher Zukunft auch größere C_N -Werte in Chipbauform zur Verfügung zu stellen. Im Hinblick auf die technologische Realisierbarkeit beim Hersteller sind diese Kondensatoren, ebenso wegen der hohen thermischen Belastungen (Lötwärmebelastung) beim Anwender, allerdings auch am schwierigsten zu beherrschen. (Immerhin muß wie beim konventionellen Vorgänger der Kondensator bis zu Innendrücken von etwa 1 MPa hermetisch dicht gegenüber Leckströmen des Betriebs-elektrolyten und dessen gasförmigen Zersetzungsprodukten sein.)

Die C_N -Werte der Festelektrolytkondensatoren auf Ta- bzw. Al-Basis überdecken zufriedenstellend den wichtigen spezifischen An-

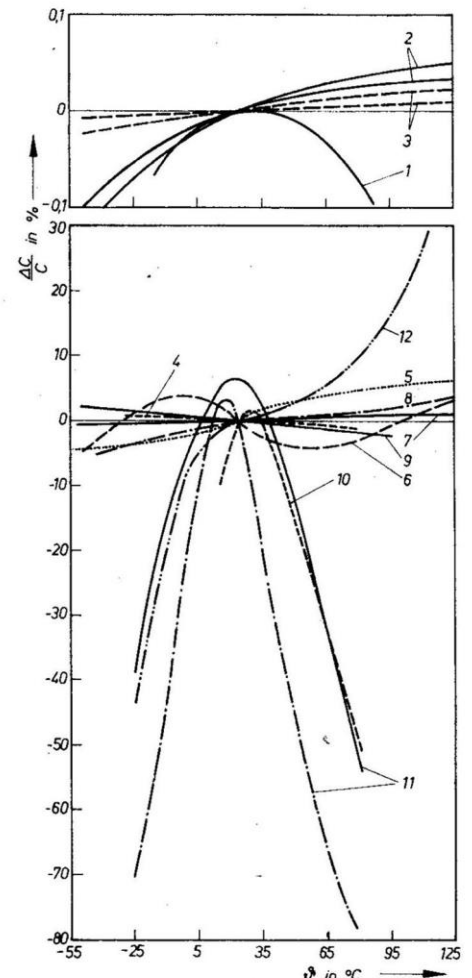


Bild 1: Temperaturabhängigkeit der NF-Kapazität von Chipkondensatoren (1 Polykarbonat; 2 NPO; 3 Glimmer; 4 Polystyrol; 5 Ta-FE; 6 X7R; 7 HI-Q; 8 MKT (PETP); 9 Polypropylen; 10 Z5U; 11 Y5V (FE = Festelektrolyt); 12 Al-Flüssigelektrolyt)

Tafel 1: Kennwertbereiche von Chipkondensatoren

Typ	C _N	U _N in V	±ΔC in %	U _S	U _U in V	R _{is} in MΩ	I _R in μA C _N ·U _N (C _N in μF, U _N in V)	tan δ in %	Δθ _B in °C
Elektrolyt									
Ta-FE, Nacktchip	0,1 bis 100 μF	4...50	5; 10; 20	-	≅ 1	-	-	4...6	-50...125
Ta-FE, umhüllt (tauchumhüllt, umspritzt)	0,1 bis 100 μF	3...50	5; 10; 20	-	≅ 1	-	0,5(0,01C _N ·U _N)	4...15	-55...125
Al-FE, umspritzt	0,1 bis 68 μF	6,3...40	10; 20	-	-	-	< 12	≅ 10	-55...125
Al-FLE, umspritzt	0,1...22 μF	6,3...63	20; -10/+50	1,2 U _N	≅ 2	-	3(0,02C _N U _N)	10...30	-40...85
Kunststoff									
MKT, umspritzt	0,1...1 μF	≅ 50	20	-	-	> 3·10 ⁴	-	0,5...1	-55...100
Keramik									
NPO/COG	0,5 pF bis 0,1 μF	≅ 200	1...20	-	-	> 10 ⁵	-	0,1	-55...100
X7R/BX	100 pF bis 4,7 μF	≅ 200	5...100/0	-	-	> 10 ⁵	-	2,5	-55...125
HI-V (NPO)	18 pF bis 39 nF	1 000...5 000	5; 10; 20	-	-	> 2·10 ⁴	-	0,15	-55...125
HI-V (X7R)	150 pF bis 390 nF	1 000...5 000	10...+100/0	-	-	> 2·10 ⁴	-	2,5	-55...125
HI-K (Y5U, Z5U)	390 pF bis 18 μF	6...12	+80/-20 bis +100/0	-	-	> 10 ⁵	-	2,5	+10...85 (Z5U) -30...85 (Y5U)
HI-Q (NPO)	0,1 pF bis 1 nF	≅ 250	1...20	-	-	> 10 ⁶	-	0,01	-55...125
Glimmer									
	4,7 bis 39 nF	63...400	0; 5; 1	-	2,5 U _N	> 10 ⁵	-	-	-55...125

wendungsbereich. Die wünschenswerte Weiterentwicklung bis zu C_N = 330 μF erfordert technologische Fortschritte um ein bis zwei Niveaus, wobei etwa 0,5 μF mm⁻³ als Volumendichte der Kapazität angestrebt werden müssen.

Kunststoffolie-Chipkondensatoren repräsentieren zwar schon recht gut den für MKT (metallisiertes Polyäthylenterephthalat) typischen C_N-Bereich, doch wartet man anwenderseitig auf Chipbauelemente mit Polystyrol, Polycarbonat und Polypropylen als Dielektrikum, um auch die vorteilhaften Eigenschaften dieser Werkstoffe zu nutzen. Dazu gehören die geringe Temperaturabhängigkeit der Kapazität und des Verlustfaktors (s. Bilder 1 und 2).

Die Nennspannungen U_N heutiger Chipkondensatoren sind mit den gebräuchlichen Spannungspegeln der Mikroelektronik kompatibel. Man wird die Hochvoltbereiche schrittweise erschließen. Am weitesten ist diesbezüglich der Keramikvielschicht-Chipkondensator als ältester dieser Bauform.

Isolationseigenschaften

Teilweise durch erhöhten Selektionsaufwand, der jedoch wegen der automatisierten Fertigungstechnologien nicht mehr so teuer wie vor wenigen Jahren bei bedrahteten Bauelementen ist, werden die üblichen C_N-Toleranzklassen (ΔC) angeboten. Während für die Spitzenspannung U_S und für die Umpolspannung U_U, soweit aus der Literatur ersichtlich ist, die gewohnten Kriterien gelten, ist es doch erstaunlich, daß auch bei den Restströmen bzw. Isolationswiderständen kaum Abstriche gegenüber konventionellen Werten gemacht werden müssen. Immerhin gelten ganz allgemeine physikalische Gesetzmäßigkeiten:

- Je kleiner das Volumen, desto stärker treten Effekte der Kanten, Ecken, Ränder, Begrenzungsflächen bzw. einfach der Abstände von Bearbeitungspunkten hervor.
- Je mehr Werkstoffkomponenten auf eng-

stem Raum, je anisotroper (gestapelt, gewickelt, mosaikartig zusammengesetzt) oder je feiner dispers ein System, desto mehr neigt es zur Instabilität und Degradation (Reaktionsdiffusionsprozesse, Delaminationen, Elektroemigrationen, Deformationen).

Beides sind Effekte, die schon immer die Isolationsfestigkeit des Kondensators beeinträchtigen. Die technische Verifizierung des spannungsfesten, langzeitstabilen Chipkondensators kennt eigentlich nur vier Wege:

- Realisierung einer gut durchgerechneten Konstruktion
- konsequente Durchsetzung einer adäquaten Technologie
- Selektionsmaßnahmen
- volle technische Umsetzung der verfügbaren und spezifischen Selbstheileffekte.

Die modernen SMD-Konzeptionen bei Kondensatoren integrieren selbstverständlich alle vier Gesichtspunkte in einem ausgewogenen und ökonomisch vertretbaren Maß. Folgerichtig sind die Temperaturabhängigkeiten (Bereiche bzw. Bezugsdiagramme) des Reststromes bzw. des Isolationswiderstandes nach Bild 3 repräsentativ für die Isolationscharakteristiken der zugrundeliegenden Dielektrika. (α_{IR} ist der Faktor, mit dem man den Wert I_R (25 °C, U_N) multiplizieren muß, um auf den aktuellen Wert I_R (θ, U) zu kommen. θ bzw. U sind die interessierenden Beträge der Betriebstemperatur bzw. Betriebsspannung.)

Verlustfaktor

Die tan δ-Angaben in der Tafel 1 (Bereich bzw. obere Grenze) sind als Richtwerte aufzufassen, die im gesamten Betriebstemperaturbereich (Δθ_B) nicht überschritten werden dürfen, wie auch die Darstellung im Bild 2 im wesentlichen bestätigt. Man muß allerdings dabei beachten, daß tan δ auch kapazitätsabhängig sein kann und auch von der Frequenz f bestimmt ist. Beispiele für die zuletzt ge-

nannte Abhängigkeit gehen aus dem Bild 4 hervor, wo auch teilweise der überlagerte Temperatureinfluß veranschaulicht wird. Diese Beziehungen unterstreichen den Richtwertcharakter solcher Angaben, wie sie in der Tafel 1 zu finden sind. Mit Rücksicht darauf legt sich der Hersteller bei seinen Kenngrößen in Datenblättern auf Größt- bzw. Grenzwerte fest, die nach Möglichkeit alle

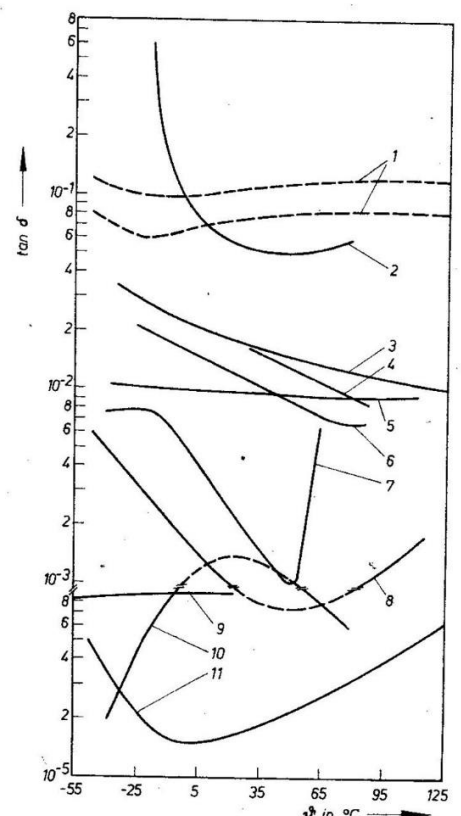


Bild 2: Temperaturabhängigkeit des NF-Verlustfaktors von Chipkondensatoren (1 Ta-FE; 2 Al-FE; 3 X7R/BX; 4 Z5U; 5 NPO/COG; 6 Y5V; 7 MKT (PETP); 8 Polycarbonat; 9 Polystyrol; 10 Polypropylen; 11 HI-Q)

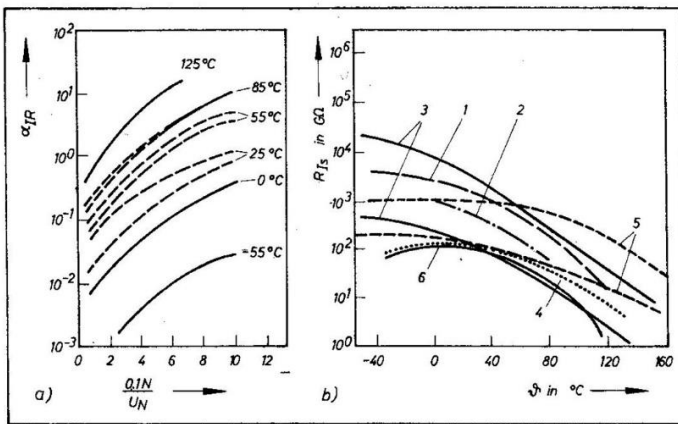


Bild 3: Temperatur- und Spannungsabhängigkeit des Reststromes von Ta-Elektrolytkondensatoren. a) Ta₂O₅-Dünnschicht-Dielektrikum; b) Temperaturabhängigkeit des Isolationswiderstandes von Keramik- und Kunststoffolielektrolytika (1 Polypropylen; 2 Polystyrol; 3 NPO; 4 Polycarbonat; 5 X7R; 6 Polyterephthalsäureester)

reichen 100 MHz, wie Bild 7 zeigt. Es ist jedoch an dieser Stelle darauf hinzuweisen, daß f_{res} -Spitzenwerte nur dann erzielt werden, wenn bereits beim Entwurf des Bauelementes auf eine induktivitätsarme Konstruktion und gut leitfähige bzw. kontaktierbare Elektroden-, Kontakt- und Armierungswerkstoffe geachtet wird. Der Frequenzabhängigkeit der Impedanz überlagert sich der Temperatureinfluß. Im Bild 8 sind entsprechende Firmenangaben für Ta-Festelektrolytkondensatoren dargestellt. (Die Impedanz bei 25°C ist mit dem Faktor α_Z zu multiplizieren, wenn man auf den aktuellen Betrag $Z(f, \vartheta)$ umrechnen will.)

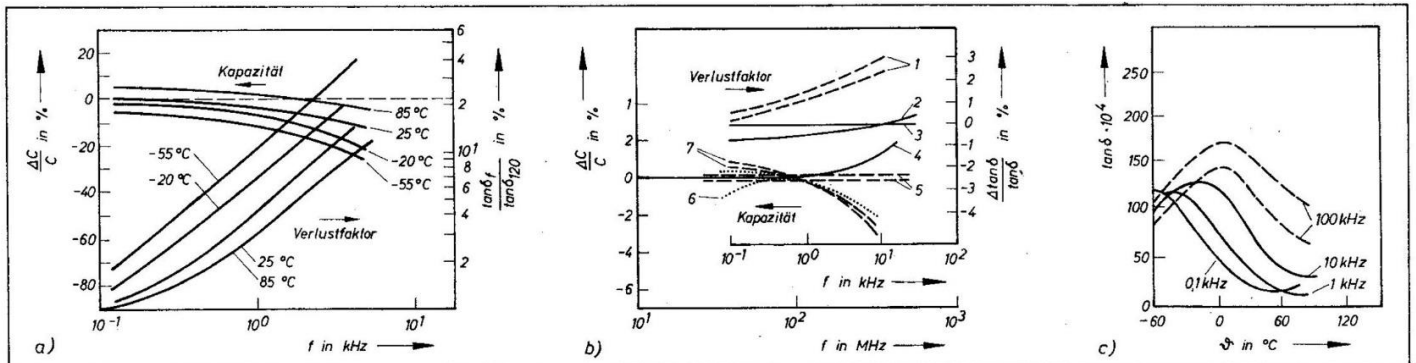


Bild 4: Frequenz- und Temperaturabhängigkeit der Kapazität und des Verlustfaktors von Chipkondensatoren. a) Ta-Elektrolytkondensatoren (Verlustfaktor auf 120 Hz bezogen); b) Keramikkondensatoren (1 Z5U, Y5V; 2 X7R/BX; 3 NPO/COG; 4 HI-Q; 5 NPO/COG; 6 HI-K; 7 X7R/BX); c) MKT-Kondensatoren

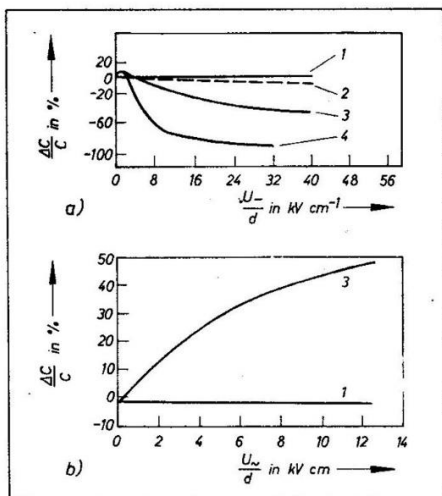


Bild 5: Abhängigkeit der Kapazität von Chipkondensatoren von der Feldstärke (Gleich- bzw. Wechselspannung, bezogen auf die Dicke d des Dielektrikums). a) Einfluß der Gleichfeldstärke bei Ta- und Keramikkondensatoren; b) Einfluß der Wechselfeldstärke bei Keramikkondensatoren (1 NPO/COG; 2 Ta-FE; 3 X7R; 4 Z5U/Y5V)

ungünstigen Kombinationen solcher unabhängiger Variabler wie Frequenz und Temperatur sowie die gegenseitige Korrelation der abhängigen Parameter berücksichtigen. In diesem Sinne ist noch größere Sorgfalt angezeigt, wenn die Kenngrößen bestimmt werden, die in die verbindlichen Standards eingehen, da sie dann für den Anwender als Garantiewerte gelten.

Im Interesse beider Partner sollte deshalb bei Erzeugnisneuentwicklungen auf eine gute Vertrauensbasis Wert gelegt werden. Das kann, entsprechend internationalen Erfahrungen, nur dadurch geschehen, daß sich die Partner gegenseitig über ihre Fertigungsbedingungen und Qualitätssicherungstechnologien informieren und eine Strategie der Qualitätskontrolle (Aus- bzw. Eingangsprüfung) auf einheitlicher Meßtechnikbasis sowie der Datenrückmeldung entwickeln. Wie dem Bild 5 entnommen werden kann, sind auch eine überlagerte Gleichspannung U_+ (bezogen auf die Dielektrikumdicke d) und die Meßwechselspannung U_+ als unabhängige Variable aufzufassen, die die Kapazität beeinflussen. Dies ist besonders auffällig bei den höherkapazitiven Keramiken der Fall.

Impedanz

Die Impedanz Z zeigt frequenzabhängig das bekannte Verhalten mit dem kapazitiven Ast bei niedrigen f und dem induktiven Verhalten im HF-Bereich. Der Übergang wird durch die Resonanzfrequenz f_{res} markiert. Bei relativ hohen Serienwiderständen R_{ser} (z. B. Kondensatoren mit Fest- oder Flüssigelektrolyten) kann sich ein plateauartiger resistiver Bereich ausbilden (s. Bild 6). Sehr bedeutsam ist die f_{res} -Verschiebung zu höheren Werten durch die neuen miniaturisierten Bauformen. So dringen Keramikchips bereits bis zu 10 GHz vor, und Ta-Festelektrolyt-Chips er-

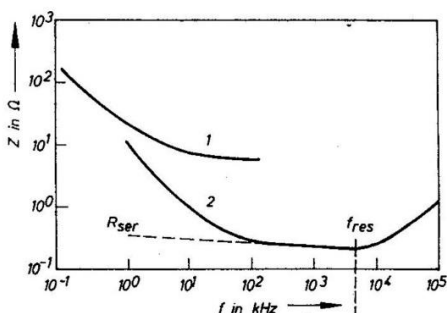


Bild 6: Impedanz von Elektrolytkondensatoren (FLE = Flüssigelektrolyt; 1 Al-FLE (10 µF/16 V); 2 Ta-FE (15 µF/4 V))

Anwendung

Aus Herstellersicht mag die hier gewählte elektrische Charakteristik des derzeit verfügbaren SMD-Sortiments bei Chipkondensatoren eher zu knapp oder zu grob ausgefallen sein. Man möge dies aber der besseren Vergleichbarkeit der Typen im engen Rahmen dieses Beitrages zugute schreiben. Der erfahrene Anwender wird dies kaum anders sehen können. Auf die eigentlichen brisanten Probleme des Kondensators, z. B. die kritische

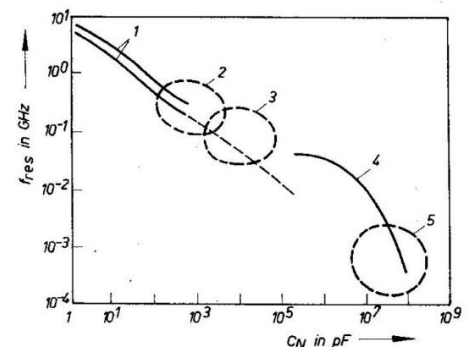


Bild 7: Bereiche der Resonanzfrequenz verschiedener Chipkondensatoren (1 Keramik; 2 Glimmer; 3 MKT; 4 Ta-FE; 5 Al-FLE)

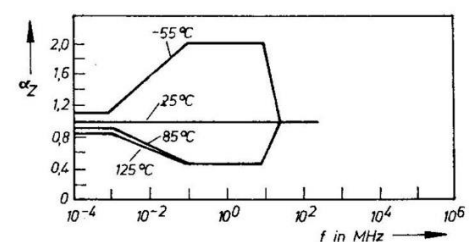


Bild 8: Impedanzmultiplikator von Ta-Chipkondensatoren in Abhängigkeit von Temperatur und Frequenz

Frequenz [2], Spitzen- und Umkehrspannung [3], Spannungsderating im Hinblick auf zulässige Betriebsfrequenz, -temperatur und -spannung, Schaltkreiswiderstand und zulässige Flankensteilheit bei Impulsbetrieb, reversible Parameteränderungen nach Löt-wärmebeanspruchung oder irreversible Kennwertdrift im Betriebszustand mit Schlußfolgerungen für die Lebensdauer wurde kaum eingegangen. Dies ist einem Folgebeitrag vorbehalten.

Die richtige Handhabung von Firmenangaben bei der Auswahl des für eine bestimmte Schaltkreisfunktion günstigsten Kondensators setzt eine gute Kenntnis der dort üblichen

Kurzbezeichnungen voraus. Die internationale Standardisierung ist nicht so weit fortgeschritten, daß eine über alle Typen hinweg vereinheitlichte Sprache vorliegt. (Wahrscheinlich wird es diese auch niemals geben, weil der technische Fortschritt die Maßstäbe setzt). So hätte man sich allein bei Keramik-Chipkondensatoren, wo die Standardisierung am weitesten fortgeschritten ist, nach diversen Gesichtspunkten folgender wichtiger Standards zu richten: TGL 42768 (DDR), GOST (UdSSR), EIA (z. B. RS-198-B, USA), EIAJ (z. B. RC-3698B, Japan), DIN (BRD) sowie der internationalen Standards RGW (z. B. 1076, 1810), JEC (z. B. 62, 63, RS-198-B).

Die hier gebrauchten Typenbezeichnungen, die sich im wesentlichen nach dem Dielektrikum, dem Elektrolyten oder nach applikativen Schwerpunkten richten, sind in der Tafel 2 zusammengestellt und nach elektrischen, konstruktiven, werkstofflichen Merkmalen und Hauptanwendungen erläutert.

Eine genauere Auswahl für bestimmte Schaltungsanforderungen sollte sich vor allem nach einem guten Modell der Kondensatorfunktion und nach den Ergebnissen der Schaltkreissimulation richten. Mit Rücksicht auf die maximale Ausnutzung der verfügbaren und zulässigen Kondensatorparameter wird man zunehmend von den gewohnten,

Tafel 2: Kurzcharakteristik wichtiger Chipkondensatortypen

Typ	elektrische und konstruktive Merkmale	Materialbasis	Applikationsbereiche
Keramik			
NPO/COG	lineare Dielektrika (Klasse I bzw. NDK-Typ) mit einstellbarem $TK_C (\leq 3 \cdot 10^{-5} K^{-1})$; C und $\tan \delta$ weitgehend unabhängig von ϑ , f und U ($\tan \delta < 0,1\%$)	BaTiO ₃ + Oxide + Seltenerd- bzw. Erdalkalitanate	Stabilisierung (Driftkompensation) in Resonanzschaltkreisen, Oszillatoren; Filterung; Applikation bis in den UHF- bzw. MW-Bereich mit hoher Parameterstabilität
X7R/BX	nichtlineare Dielektrika (Klasse II bzw. HDK-Typ) mit großem und mittlerem $TK_C (\Delta C/C \leq \pm 15\%$ bei $\vartheta_B = -55...125^\circ C$, $\tan \delta < 2,5\%$)	BaTiO ₃ + Seltenerd-titanate bzw. Zirkonate	Bandpaß-Applikationen, Ladungsspeicherung, Kopplung, Filterung, Frequenzdiskriminierung, Gleichspannungsabblockung, Einschaltspannungsunterdrückung
Z5U/Y5V	nichtlineare Dielektrika (Klasse II bzw. HDK-Typ) mit großem ϵ und $TK_C (\Delta C/C = -56 + 22\%$ bei $\vartheta_B = 10...85^\circ C$)	wie X7R/BX mit partieller BaO- oder TiO ₂ -Substitution	Bandpaß-Applikationen, Entkopplung; NV-Applikationen
HI-Q	sehr geringe $TK_C (\leq 9 \pm 2 \cdot 10^{-5} K^{-1})$, extrem geringe $\tan \delta (< 0,01\%)$ bzw. extrem große Q ($> 10^4$); spezielle Edelmetallelektroden mit vorverzinsten Anschlüssen	NPO-Basis bzw. Spezialkeramiken	VHF-, UHF-, MW-, Breitband- und rauscharme Applikationen, wo es auf geringe Verluste ankommt
HI-V	hohe Spannungsfestigkeit ($U = > 1$ kV); u. a. spezielle Freirand- und Isolator dickendimensionierung	NPO-Basis (extrem geringer Spannungskoeffizient) und X7R-Basis (mittlerer Spannungskoeffizient, höhere C_N)	hybridintegrierte bzw. auf Leiterplatten realisierte Leistungselektronik
HI-K	große Kapazitätsdichten (C_N bis 15 μF), vorzugsweise für $U_N < 25$ V	Z5U-Basis (mittlere Kapazitätsdichte) und Y5V-Basis (extrem große Kapazitätsdichte)	Kopplung, Entkopplung, Abblockung, Glättung, breites Anwendungsgebiet in der Hybridtechnik; HF-Eignung, wo höhere Verluste und geringere Parameterstabilität (im Vergleich zu NPO und X7R) zulässig sind
TC	C-Netzwerk-Chips; einstellbarer $TK_C = (9 \pm 2)...(330 \pm 50) 10^{-5} K^{-1}$ im Bereich $\vartheta_B = -55...125^\circ C$, $\tan \delta < 0,2\%$	bedarfsgerechte Nutzung aller verfügbaren Keramiken, um breite C_N - und TK_C -Bereiche zu überstreichen	Kopplung, Filterung, Stabilisierung; Bandpaßapplikationen (insbesondere Hybridtechnik)
Elektrolyt			
Al-Flüssigelektrolyt (Al-FLE)	anodisch oxydiertes Ventilmittel als Oxidelektrode; vielkomponentiger ionenleitender Flüssigbetriebslektrolyt dient als Katode; schaltfeste Konstruktion (besonders bei Wickelkonstruktion mit geringer Selbstinduktivität)	Al(geätzt)-Al ₂ O ₃ (anodisch oxydiert)-flüssiger Betriebslektrolyt (z. B. wasserarme Mischung von Borsäure mit organischen Säuren und Zusätzen)	Glättung, Siebung, Kopplung, Entkopplung, Überbrückung, Ladungs- und Energiespeicherung, Phasenschiebung; Applikationen mit hohen Schaltfestigkeitsanforderungen (u. a. getaktete Netzteile)
Al-Festelektrolyt (Al-FE)	anodisch oxydiertes Ventilmittel als Oxidelektrode; elektronenleitender MnO ₂ -Festelektrolyt dient als Katode; hohe Schaltfestigkeit des Al-Al ₂ O ₃ -Systems in Verbindung mit geringerer Parameterdrift im Vergleich zur Al-FLE-Konstruktion, sehr geringe Ausfallrate ($< 10^{-8} h^{-1}$)	Al(geätzt)-Al ₂ O ₃ (anodisch oxydiert)-MnO ₂ -Festelektrolyt (bei japanischen Neuentwicklungen werden elektronenleitende organische Festkörper auf TCNQ-Basis eingesetzt)	Glättung, Ladungs- und Energiespeicherung; schaltfester als Ta-FE; teilweise Substituent von Ta-FE
Ta-Festelektrolyt (Ta-FE)	anodisch oxydiertes Ventilmittel als Oxidelektrode; elektronenleitender MnO ₂ -Festelektrolyt dient als Katode; extrem hohe Kapazitätsdichte ($> 1 \mu F mm^{-3}$), hohe Parameterstabilität, sehr geringe Ausfallrate ($< 10^{-7} h^{-1}$)	Ta(gesintert)-Ta ₂ O ₅ (anodisch oxydiert)-MnO ₂ -Festelektrolyt	Glättung, Ladungsspeicherung (Pufferung, Spannungsverdopplung, Energiespeicherung), Filterung (u. a. Schaltnetzteile); Einsatzbereiche mit extrem hoher Kapazitätsdichte und Zuverlässigkeit (u. a. implantierbare medizintechnische Hybridschaltkreise)
Kunststoff			
(PETP)	hohe Kapazitätsdichte, sehr gutes Regenerierverhalten; hohe Lötwärmebeständigkeit (tauchlötfähig)	Al-metallisiertes PETP (Stirnflächen-Schoopbelag)	erste tauchlötfähige Kunststoff-Chipausführung; Gleich- und Wechselspannungsapplikationen; Eignung für Impulsbelastungen; Ladungsspeicherung, Filterung; Einsatz in frequenzbestimmenden Kreisen
MKP-Polypropylen ¹⁾	extrem kleiner $\tan \delta$, hohe Impulsfestigkeit (Flankensteilheit $\Delta U_S/\Delta t > 1000 V \mu s^{-1}$ bei vollem Spannungshub bis zur Spitzenspannung U_S)	Al-metallisiertes Polypropylen	Einsatz in HF-, ZF- und Trägerfrequenzfiltern (geringe Verluste); Einsatz in Schwingkreisen mit großer Langzeit- und Temperaturkonstanz; Leistungselektronik (hohe Impulsfestigkeit)
MKC-Polycarbonat ¹⁾	geringe Temperaturabhängigkeit der Kapazität ($\Delta C/C < 1\%$ in $\vartheta_B = -55...100^\circ C$)	Al-metallisiertes Polycarbonat	wie MKT bzw. MKP, jedoch mit erhöhten Anforderungen an die Temperaturkonstanz (geringe TK_C)
Glimmer	Konstruktion vergleichbar mit Keramik-Chips; hohe Parameterstabilität	metallisierter Naturglimmer als Vielschichtstapel	in Oszillatorschaltungen und anderen Anwendungsfällen, wo es auf Eignung für sehr hohe Frequenzen (relativ niedrige Kapazitäten!) und Parameterstabilität ankommt

¹⁾ bisher keine Chipausführung bekannt

Tafel 3: Anmerkungen zu den individuellen Besonderheiten der verschiedenen Chipkondensatortypen

R _{IS} -bestimmende Gesichtspunkte		kapazitätsbestimmende Bestandteile	widerstandsbestimmende Bestandteile		induktivitätsbestimmende Merkmale			
Stromtransporttyp	ladungstransportbestimmendes Gebiet		Elektroden	Kontakte, Armierung				
Al-Elko mit Flüssig-elektrolyt	raumladungsbegrenzt bzw. Poole-Frenkel- bzw. Hopping-Mechanismus	Volumen der oxidischen Sperrschicht (Al ₂ O ₃ bzw. Ta ₂ O ₅)	8...10	Al-Folie (≈ 20 μm, geätzt und gewickelt)	Al ₂ O ₃ , 0,02...0,1	flüssiger Betriebs-elektrolyt in Poren der geätzten anodisch oxydierten Folien (ζ _{FLE} ≈ 1...10 Ω cm)	Kaltschweißverbindung Folie – Anschluß-fahne	Anordnung der Kaltschweißkontakte, Anzahl der Anschlußfahnen, Ausführung der Anschlußfahnen
Ta-Fest-elektrolyt			20...27	Ta-Sinterkörper (zu porösem Formkörper gepreßt, gesintert, Teilchendurchmesser ≤ 5 μm, ≈ 50 % Porosität)	Ta ₂ O ₅ , 0,05 bis 0,2	MnO ₂ -Festelektrolyt in Poren des anodisch oxydierten Sinterkörpers (ζ _{MnO₂} ≈ 0,1 bis 1 Ω cm)	ohmsche (nichtoxydierende) Kontaktierung des MnO ₂ (i. allg. Kolloidgraphit); lötfähige Metallisierung (Leitsilber bzw. Ag-Leitkleber)	geometrische Ausführung des Sinterkörpers (Kantenlängenverhältnisse), Geometrie des Anodenanschlußdrahtes, ferroelektrische Bestandteile der Armierung (z. B. Ni)
Al-Fest-elektrolyt			8...10	Al-Folie (≈ 20 μm, gefaltet und gestapelt)	Al ₂ O ₃ , 0,05 bis 0,2	MnO ₂ - (bzw. TCNQ-)Festelektrolyt in Poren der anodisch oxydierten geätzten Folien (ζ _{FE} ≈ 0,1 bis 1 Ω cm)	Festelektrolytbahngebiet zwischen den gestapelten Folien, ohmsche (nichtoxydierende) Kontaktierung und lötfähige Metallisierung (wie bei Ta-FEK)	geometrische Ausführung des Faltkörpers (Kantenlängenverhältnisse), Geometrie und ferroelektrische Bestandteile der Armierung
metallisierte Kunststoff-folie	ohmsches Verhalten bei niedrigen Spannungen bzw. raumladungsbegrenzt bzw. Poole-Frenkel-Mechanismus	Volumen des Kunststoffes (in Elektroden-nähe)	2,0...3,5	Kunststoffolie (Dünnschichtmetallisierung, gewickelt bzw. gestapelt)	Kunststoff-dielektrikum, 1...5	Metalldünn-schicht, vakuum-beschichtet (d ≈ 50 nm, ζ ≈ 5 bis 10 μΩ cm)	Stirnflächen-Kontaktverbindungen zwischen Elektrodenrand im Wickel bzw. Stapel und äußerem Schoop-Belag	geometrische Ausführung des Wickels bzw. Stapels, ferroelektrische Bestandteile der Armierung
Keramik-vielschicht	raumladungsbegrenzt (Abhängigkeit der Charakteristik von der lokalen Elektrodenkrümmung) bzw. ohmsches Verhalten bei niedrigen Spannungen	Volumen der Keramik in Elektroden-nähe	10...16000	Keramikfolie (Dickschichtmetallisierung, gestapelt in 5 bis 100 Lagen)	Kunststoff-dielektrikum 5...20	metallische Dickschicht, als Paste auf Grünkeramik gedruckt und gesintert, (d ≈ 3...5 μm, ζ ≈ 40 μΩ cm)	Stirnflächen-Kontaktverbindung zwischen Elektrodenrand im Stapel und äußerer Dickschichtkontaktierung	geometrische Ausführung des Stapels

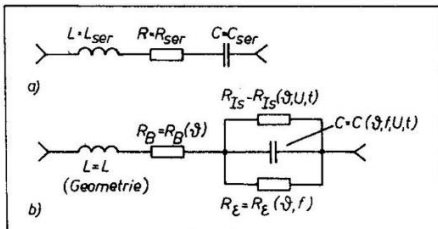


Bild 9: Ersatzschaltungsmodelle von Chipkondensatoren. a) Einfache Serienschaltung; b) verbesserte Ersatzschaltung

allzu einfachen Ersatzschaltungsmodellen abgehen müssen, wie im Bild 9a dargestellt ist. Immerhin lassen sich typunabhängig die Impedanz und die aus ihr abgeleiteten Größen

mit ihrer Resonanzfrequenz recht gut qualitativ interpretieren. Will man jedoch wenigstens einige voneinander abweichende Charakteristiken der unterschiedlichen Kondensatortypen qualitativ besser verstehen, so ist das Modell zu verbessern und zu spezifizieren. Bild 9b zeigt dazu einen möglichen Ansatz. Darin werden die real unvermeidlichen induktiven (L_{ges}) und Bahnwiderstandskomponenten (R_{ges}) seriell und die eigentlich interessierende Kapazität C parallel zu ihrem Isolationswiderstand R_{IS} bzw. dielektrischen Verlustwiderstand R_E betrachtet. Man kann die individuellen Typeigenschaften durch die wichtigsten Abhängigkeiten von den Variablen t, f, ϑ, U fixieren. Dazu bedarf es jedoch einer sehr genauen Kenntnis der je-

weils dominierenden spezifischen Charakteristik, wozu Tafel 3 einige Hinweise gibt.

Literatur

- [1] Langer, H.-D.: Einsatzkriterien von Chipkondensatoren. radio fernsehen elektronik, Berlin 37 (1988) 2, S. 81–84; 3, S. 186–190
- [2] Döring, H.-U.; Langer, H.-D.: Mehrdimensionale Behandlung der Bauelementefunktion von Elektrolytkondensatoren mit poröser Anode. Nachrichtentechnik - Elektronik, Berlin 33 (1983) 4, S. 168–171
- [3] Langer, H.-D.; Schuricht, K.: Funktion und Einsatz von Elektrolytkondensatoren. radio fernsehen elektronik, Berlin 30 (1981) 8, S. 513–516, 9, S. 591–594