

Der Kondensator und seine Resonanzeffekte

Dipl.-Ing. H. WEISSELEDER — DM 2 CEK

Es ist allgemein bekannt, daß man heutzutage bei der Entwicklung von Schaltungen Spulen und Drosseln nach Möglichkeit umgeht. Das liegt meistens daran, daß es sich um Wickelbauelemente handelt, die schwierig zu fertigen und daher teuer sind. Man versucht daher alles, um sie zu umgehen oder zu ersetzen. Bei all diesen Versuchen gewinnt der Kondensator zunehmend an Bedeutung.

Bei den monolithisch integrierten Schaltkreisen versucht man nicht nur Induktivitäten zu umgehen, sondern man sieht zu, auch ohne Kapazitäten auszukommen. Das liegt an der meist ungenügenden Genauigkeit solcher integrierten Kondensatoren und daran, daß sie viel Platz erfordern. Letzteres bestimmt den Preis entscheidend. Wir als Amateure brauchen mit Kondensatoren nicht unbedingt zu sparen und wollen auch keine IS entwickeln, sondern sie anwenden.

In unseren Amateurgeräten werden zahlreiche Kondensatoren an den unterschiedlichsten Stellen eingesetzt. Das reicht vom Elko im Netzteil über Koppl- und Abblockkondensatoren bei Röhren- und Transistorstufen bis hin zu den Oszillatoren, wo sie die erzeugte Frequenz entscheidend beeinflussen. Die nachfolgenden Ausführungen sollen nur einen kleinen, aber sehr wichtigen Teil der hiermit im Zusammenhang stehenden Problematik ansprechen. Keinesfalls soll auf alle Erscheinungen oder speziellen Anwendungsfälle eingegangen werden. Die am Ende angegebenen Literaturhinweise geben dem interessierten OM ausführliche Hinweise zu fast allen Fragen. Diesen Quellen wurden z. T. Bilder und Tabellen auszugsweise entnommen. Nach einer kurzen theoretischen Ab-

handlung sollen Zahlenwerte und eine brauchbare Faustformel angegeben werden, die für die praktische Arbeit gute Dienste leisten werden.

Was verlangen wir eigentlich von einem Kondensator? Er soll eben ein Kondensator sein, d.h. einen frequenzabhängigen kapazitiven Scheinwiderstand realisieren und einen hohen Isolationswiderstand aufweisen. Ferner sollen seine Eigenschaften unabhängig von der Umgebungstemperatur und der anliegenden Spannung sein und keine Alterung aufweisen. Wir wollen uns an dieser Stelle nur der Frage zuwenden, hat der Kondensator bei allen auftretenden Frequenzen auch wirklich einen kapazitiven Scheinwiderstand gemäß (1)?

$$R_c = \frac{1}{j\omega C} \quad (1)$$

Beim „technischen“ Kondensator, im Gegensatz zum „theoretischen“ Kondensator, ist das leider nicht der Fall. In der Praxis müssen wir unsere Bauelemente stets so auswählen oder einsetzen, daß die tatsächlichen Eigenschaften den gewünschten (denen der „theoretischen“ Bauelemente der zu realisierenden Schaltung) möglichst nahekommen. Gelingt das nicht, wird die Schaltung auch nicht so funktionieren, wie „theoretisch“ von ihr zu erwarten ist.

Bei einer Reihe von Kondensatoren ist es klar, daß sie nicht nur einen Kondensator darstellen, sondern auch eine kleine Spule beinhalten. Das sind z. B. alle gewickelten Kondensatoren. Die häufigsten Vertreter sind die Styroflex- und Duroplastkondensatoren, aber auch die MP- und Elektrolytkondensatoren gehören dazu.

Damit die tatsächlichen Eigenschaften

realer Bauelemente besser verstanden und der Berechnung zugänglich gemacht werden können, werden die realen Bauelemente häufig durch Ersatzschaltbilder beschrieben. Es versteht sich, daß die in den Ersatzschaltbildern angegebenen „Bauelemente“ ideale Eigenschaften haben. Ein Kondensator ist dann z. B. exakt gleichstromundurchlässig und hat bei allen Frequenzen die angegebene Kapazität. Von Ersatzschaltungen, wo diese Bedingung nicht gilt, wollen wir an dieser Stelle absehen.

Bild 1 zeigt eine Reihe weiter nicht erklärter Ersatzschaltbilder für Kondensatoren der unterschiedlichsten Bauformen und -größen. Das einfachste und für die meisten Fälle ausreichende Ersatzschaltbild eines Kondensators wird in Bild 2 wiedergegeben. Dabei bedeuten:

L = Serieninduktivität (sie rührt von der Wickelinduktivität bei Wickelkondensatoren her, der Induktivität der Anschlußdrähte, der geometrischen Ausdehnung des Kondensators z. B. Länge des Röhrchens)

R_s = Ohmscher Serienwiderstand (rührt vom Widerstand der Anschlußdrähte und des Belages her. Dieser Widerstand ist in Wirklichkeit frequenzabhängig — Skineffekt!)

R_p = Parallelwiderstand (er leitet die Kriechströme an der Oberfläche von Halterung und durch Isolationswiderstände des Dielektrikums ab)

C = Eigentlicher Kondensator (Kapazitätswert, der aufgedruckt ist, und meistens bei 1000 Hz gilt).

Damit kann das frequenzabhängige Verhalten des Kondensators ausgerechnet werden. Es ergibt sich zu (2):

$$R_c(f) = j\omega L + R_s + \frac{R_p}{1 + j\omega C R_p} \quad (2)$$

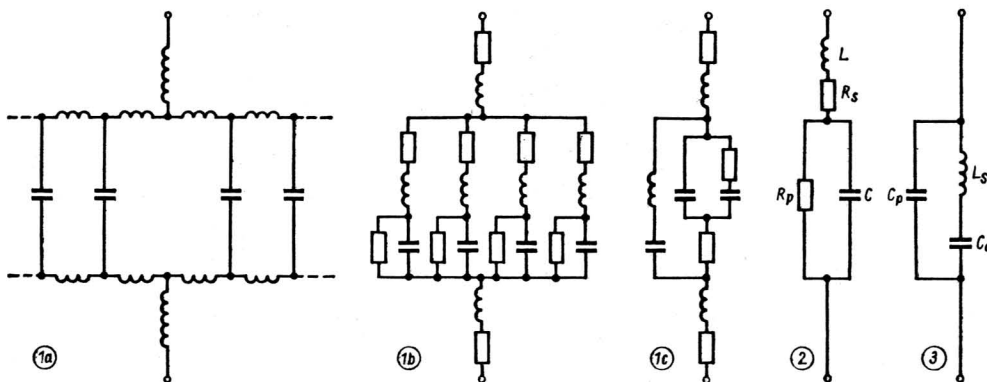


Bild 1: Eine Auswahl verschiedener Ersatzschaltbilder, wie sie z. B. bei a, b für Wickelkondensatoren und c bei Elektrolytkondensatoren angewandt werden

Bild 2: Einfache Ersatzschaltung eines Kondensators

Bild 3: Einfache Ersatzschaltung für die Parallelschaltung zweier Kondensatoren

oder, wenn die Verlustwiderstände nicht beachtet werden ($R_s = 0, R_p = \infty$), ergibt sich die Formel des Reihenschwingkreises (3)

$$R(f) = j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = j \sqrt{\frac{L}{C}} \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \quad (3)$$

dabei ist ω_0 die Resonanzfrequenz mit

$$\omega_0 = 2\pi f_0 \text{ und } f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (4)$$

Unterhalb der Resonanzfrequenz ist der Scheinwiderstand in (3) kapazitiv, oberhalb induktiv. Der Klammerausdruck verändert sein Vorzeichen. Das bedeutet aber auch, daß der „Kondensator“ oberhalb der aus L und C gebildeten Resonanzfrequenz wie eine „stromundurchlässige Induktivität“ wirkt.

Die Kapazität des Kondensators ist demzufolge frequenzabhängig. Wenn wir die wirksame, reale und damit auch meßbare Kapazität mit C_{eff} bezeichnen, errechnet sich diese gemäß (5) zu:

$$C_{\text{eff}} = \frac{C}{1 - \omega^2 LC} = \frac{C}{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2} \quad (5)$$

Auch diese Formel zeigt an, daß die Kapazität oberhalb der Resonanzfrequenz ($f > f_0$) negativ wird und damit keine Kapazität mehr darstellt, sondern wie eine Spule wirkt. Das ist aber auch der Kern der ganzen Problematik. Wir haben also zu berücksichtigen, daß wir unsere Kondensatoren unterhalb dieser Resonanzfrequenz betreiben müssen, ansonsten können sich erhebliche Fehler einschleichen, die nur schwer zu finden sind.

Bild 5 gibt das bisher Festgestellte grafisch wieder. Es zeigt in doppelt logarithmischer Darstellung die zu erwartende und die gemessene Kurve des Scheinwiderstand-Betrages $|R_c|$ eines Kondensators mit $C = 8050 \text{ pF}$. Die Ge-

rade verläuft entsprechend (1), es sind die dazugehörigen Scheinwiderstandsbeträge als Funktion der Frequenz ablesbar. Es ist festzustellen, daß der technische, reale Kondensator bis zu seiner Resonanzfrequenz und ein kleines Stück darüber hinaus einen kleineren Scheinwiderstandsbetrag hat als der „theoretische“ Kondensator. Dieser Sachverhalt ist in der Mehrzahl der Fälle sehr positiv. Daraus kann zugleich geschlußfolgert werden, daß der Kondensator praktisch gar nicht so groß zu sein braucht, wie theoretisch berechnet. Ganz besonders günstig ist dies in der unmittelbaren Nähe der Resonanzfrequenz. In Abhängigkeit von der Güte des Kondensators (Verlustwinkel, Größe von R_s und R_p) wird der im Resonanzfall auftretende Scheinwiderstand wesentlich kleiner sein als nach Gl. (1) berechnet. Praktisch sind diese Resonanzwiderstände etwa 10mal kleiner, d. h., wird der Resonanzeffekt ausgenutzt, könnte meist ein Kondensator mit einem Zehntel des Kapazitätswertes zum Ziele führen. Was kann daraus geschlußfolgert werden?

- Soll ein Kondensator z. B. breite Frequenzbänder niederohmig übertragen und dabei kapazitiv bleiben, so muß die Resonanzfrequenz oberhalb der höchsten interessierenden Frequenz liegen.
- Sind nur eine Frequenz oder sehr schmale Frequenzbänder zu übertragen (Abblockkondensator in ZF-Stufen), so sollte der Resonanzeffekt ruhig ausgenutzt werden. Das ist industriell durchaus üblich. Dieser Effekt wurde beim Abblocken von Stromversorgungsleitungen bei DM 2 CEK schon des öfteren erfolgreich ausgenutzt. Bild 4 zeigt den Siebkondensator für die Stromzuführung auf der ZF-Platine des KW-Empfängers. Beim Einsatz von Epsilon-Kondensatoren sollte aber auf alle Fälle bedacht werden, daß diese meist einen um 100mal größeren Temperaturkoeffizienten haben, als alle anderen Kondensato-

ren! Das heißt, die Dimensionierung darf nicht überkritisch erfolgen. Die seit Jahren eingesetzten Epsilankondensatoren arbeiten auch heute noch zur vollen Zufriedenheit.

Zur Bestimmung der Resonanzfrequenz benötigen wir den Kapazitätswert bei tiefen Frequenzen und die zwischen den beiden Anschlüssen des Kondensators herrschende Induktivität. Der Kapazitätswert des Kondensators ist aufgedruckt, die Beschriftung gibt über die gesuchte Induktivität L_s jedoch keine Auskunft. Hier hilft Bild 6. Es vermittelt eine Übersicht über die Abhängigkeit der Induktivität der Anschlußdrähte von ihrer Länge und vom

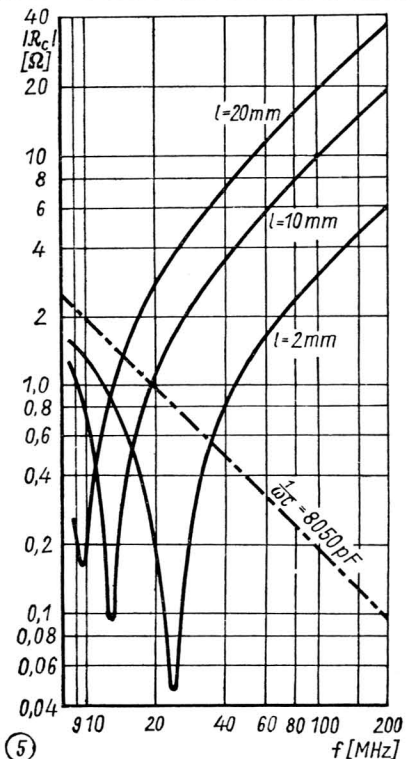


Bild 5: Betrag des Scheinwiderstandes R_c eines keramischen Scheibenkondensators bei verschiedenen Längen der beiderseitigen Anschlußdrähte

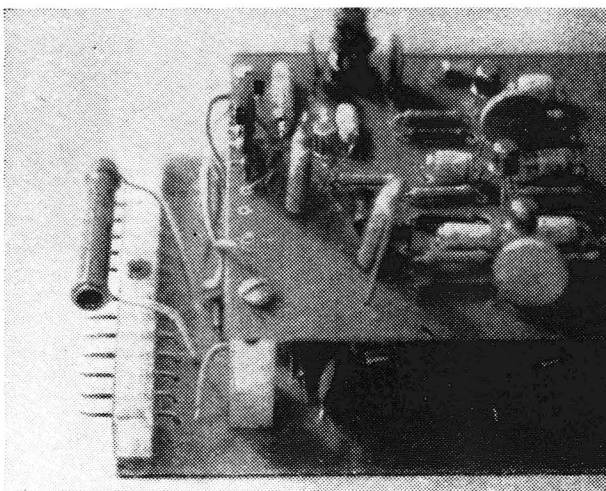


Bild 4: Der 47-nF-Abblockkondensator mit seinen im Bild ausgerollten Anschlußdrähten hat bei der ZF von 4,5 MHz Resonanz

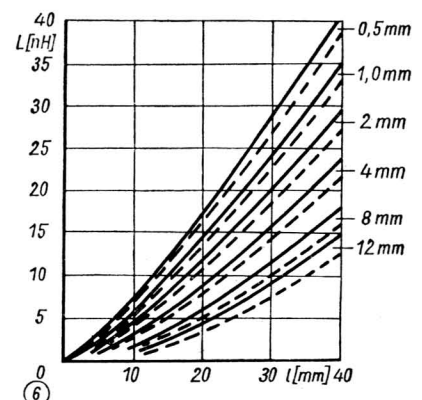


Bild 6: Induktivität von geraden, gestreckten Leitern in Abhängigkeit von der Länge und dem Durchmesser. Die gestrichelten Geraden zeigen, wie die Induktivität bei hohen Frequenzen als Folge des Skin-Effektes sinkt

Durchmesser. Der sich abzeichnende Zusammenhang ist weitgehend linear. Wie die gestrichelten Geraden angeben, sinkt die Eigeninduktivität mit wachsender Frequenz als Folge des Skineffektes. Im praktischen Fall haben die Anschlußdrähte zwischen 0,5 ··· 1,0 mm Durchmesser. Gemittelt ergibt das als Näherung eine längenabhängige Induktivität gemäß (6):

$$L \approx 1 \cdot \frac{L}{\text{nH}} \cdot \frac{l}{\text{mm}} \quad (6)$$

(1 nH $\approx 10^{-9}$ H). Diese Näherungsformel soll gleich einmal ausprobiert werden. Dazu werden die aus Bild 5 entnehmbaren Werte verwendet. Der Kondensator hat etwa 8 nF und die Anschlußdrähte haben eine Länge von jeweils $l = 20$ mm.

$$l_{\text{ges}} = 2l = 40 \text{ mm} \rightarrow L = 40 \text{ nH}$$

Mit (4) ergibt sich

$$f_0 = \frac{1}{6,28 \sqrt{40 \cdot 10^{-9} \text{ H} \cdot 8 \cdot 10^{-9} \text{ F}}} \\ \approx \frac{100 \cdot 10^6}{6,28 \cdot 18} \text{ Hz} \approx 8,9 \text{ MHz}$$

Das stimmt mit dem Meßergebnis in Bild 2 recht gut überein. Hat der Kon-

densator selbst eine nennenswerte Ausdehnung in Richtung der Anschlußdrähte (Röhrchenkondensator), so trägt diese „Länge“ auch zur Entstehung der Reiheninduktivität bei. Die Näherung gemäß (6) müßte demzufolge in Abhängigkeit von der Gestalt des Kondensators etwas korrigiert werden. Für überschlägige Berechnungen ist sie dennoch gut, solange die Anschlußdrähte nicht extrem kurz sind und der Kondensator lang ist. Dazu die Kurven von Bild 7, die für einen Wickelkondensator gelten.

Wenn wir kurz zusammenfassen, kann gesagt werden, daß das Auftreten von Resonanzeffekten von der geometrischen Gestalt des Kondensators abhängt. „Kompliziertere“ Kondensatoren werden auch hier demzufolge „komplizierter“ erscheinen. Alles bisher Gesagte ist bei Scheibenkondensatoren einfach und übersichtlich, bei Röhrchenkondensatoren nicht nennenswert schwieriger. Bei Wickelkondensatoren treten neue Resonanzstellen hinzu. Bild 7 zeigt hier ein Beispiel, wie sich oberhalb der Serien-Resonanzfrequenz noch eine Parallel-Resonanzfrequenz abzeichnet. Der Betrag des Scheinwiderstandes wächst bei dieser Frequenz sehr stark an. Der Kondensator wirkt praktisch so, als ob er nicht da wäre. Zwischen der Serien- und der Parallelresonanzfrequenz ist der Scheinwiderstand induktiv!

Tabelle 1 vermittelt für zwei weitere Wickelkondensatoren die charakteristischen Frequenzen in Abhängigkeit von der Länge der Anschlußdrähte.

Eine Parallelresonanz bildet sich aber auch heraus, wenn zu einem Kondensator mit großem Kapazitätswert, der bei der betrachteten Frequenz schon induktiv wirkt, ein kleiner (Scheiben-) Kondensator parallel geschaltet wird. Das Parallelschalten ist sehr problematisch, da sich die oberhalb der Serienresonanz des großen Kondensators herausbildende Parallelresonanz um so näher an diese heranrückt, je größer der parallelgeschaltete Kondensator ist. Wird dieser jedoch zu klein gewählt, geht dessen Wirkung unter. Um diesen Sachverhalt zu überschauen, muß gerechnet oder gemessen werden. Bild 3 zeigt das vereinfachte Ersatzschaltbild dieser Parallelschaltung, das oberhalb der Serienresonanz des großen Kondensators und unterhalb der neuen Parallelresonanz gilt. Die sich

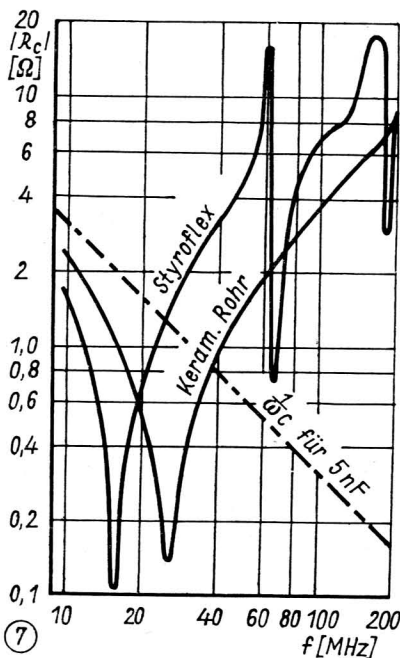


Bild 7: Verlauf des Scheinwiderstand-Betrages eines 5-nF-Keramik- und eines 5-nF-Styroflexkondensators. Die entstehenden Parallelresonanzen sind deutlich ersichtlich

Abhängigkeit der Lage der ersten Serien- und Parallelresonanz bei zwei verschiedenen Duroplastkondensatoren

Cn [nF]	Un [V]	f _{S1} [MHz] für		f _{P1} [MHz] für	
		l = 10 mm	l = 32 mm	l = 10 mm	l = 32 mm
47	63	4,0	2,7	48	48
	250	3,5	2,7	37,5	37,5
	630	3,3	2,7	23	28
	1000	4,0	3,0	27	28
100	250	≈ 2,5	≈ 2,0	20	20
	630	≈ 2,5	≈ 2,0	21	21
	1000	≈ 2,5	≈ 2,0	18	18

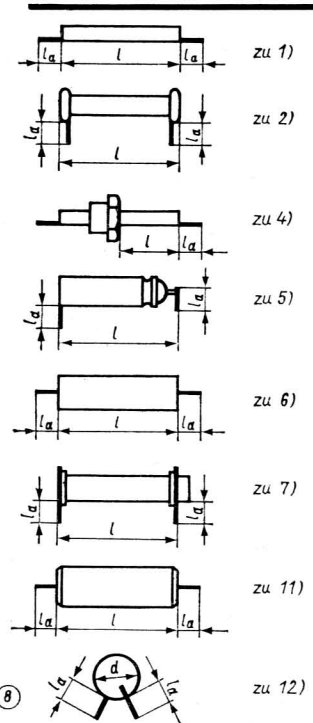


Bild 8: Skizzen der in Tabelle 2 angegebenen Kondensatoren

herausbildende Parallelresonanz berechnet sich gemäß (7)

$$f_p \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_o + C_p}{L_s C_o C_p}} \\ = f_0 \sqrt{1 + \frac{C_o}{C_p}} \quad (7)$$

Die zweite Tabelle gibt für eine ganze Reihe auch heute noch verwendeter Kondensatoren die in Praxis interessierenden Werte an. Sie dürfte in kritischen Fällen eine gute Arbeitsunterlage sein.

Anschließend zwei typische Werte, die man auswendig wissen sollte:

- handelsübliche Epsilanscheibe
1 nF $\rightarrow f_s \approx 30$ MHz
- handelsübliche Epsilanscheibe
20 nF $\rightarrow f_s \approx 7$ MHz

Alle anderen Zahlenwerte (Kapazitäten, Drahtlängen usw.) können, unter Beachtung des durch die Schwingungsgleichung (4) gegebenen Zusammenhangs, berechnet werden. Dabei bedeutet z. B. 4fache Kapazität = Resonanzfrequenz auf das 0,5fache zurückgegangen. Halbe Drahtlänge = Resonanzfrequenz um das 1,4fache höher. Erinnern wir uns noch einmal, auch kommerziell werden diese Effekte beachtet und ausgenutzt. Ein Beispiel ist der Basis-Abblockkondensator des UHF-Vorstufentransistors in kommerziellen UHF-Konvertern (oder Tunern). $C = 22$ pF und $l = 4$ mm, das ergibt $f_0 = 540$ MHz.

Fazit: Überprüfen Sie Ihre Emittier- und Katodenabblock-Kondensatoren und deren Drahtlängen bis Masse. (Fortsetzung auf S. 344)