

Zur Theorie und Berechnung von Collins-Filtern – Teilreprint mit Berichtigungen zu [1]

Dr.-Ing. HENNING PEUKER – DL2DSD

Dieser Teilreprint stellt einen Auszug aus [1] von 1980 mit Berichtigungen dar. Erlauerungen sind als Fußnoten angefugt.

Trotz wachsender Transistorisierung werden Rohrendstufen und z. T. auch Treiberstufen mit Collins-Filtern realisiert. Wie werden sie berechnet? Wie wirkt sich eine verlustbehaftete Induktivität auf den Wirkungsgrad (Durchlassdämpfung) aus und welche Schlussfolgerungen ergeben sich für eine praxisnahe Dimensionierung?

■ Grundlagen

Aufgabe des Collins-Filters ist es, die einem aktiven Zweipol maximal entnehmbare HF-Leistung bei der Betriebsfrequenz f_B möglichst vollständig auf den Verbraucherwiderstand R_2 zu übertragen (Bild 1). Außerdem sollen Leistungsanteile außerhalb f_B möglichst stark gedämpft werden. Collins-Filter werden auf maximale Ausgangsleistung an R_2 abgestimmt. Sie werden so berechnet, dass ein Wert (meist die Kapazität C_1) vorgegeben wird.¹⁾

$$X_{C1} = \frac{R_1}{Q_B} \quad (1)$$

Q_B , die Betriebsgute²⁾, ist ein Faktor, der nur qualitativ ein Maß für die Selektions-eigenschaften und für die Verluste ist. Ebenso lässt sich nur qualitativ ausdrücken, dass die Selektion mit größerem Q_B besser wird, dafür aber die Filterverluste bei verlustbehafteten Bauelementen ansteigen. In diese Beziehungen gehen auch R_1 und R_2 ein. Q_B wird in der Praxis zwischen 10 und 20, meist nur zwischen 12 und 15 gewählt.

■ Verlustfreies Collins-Filter

Für ein abgestimmtes verlustfreies Collins-Filter (Bild 1) gilt unter Vorgabe von X_{C1} für die Bestimmung der übrigen Bauelemente X_{C2} und X_L

$$X_{C2} = R_2 \sqrt{\frac{\frac{R_1}{R_2}}{Q_B^2 + 1 - \frac{R_1}{R_2}}} \quad (2)$$

¹⁾ Die Größe des Innenwiderstands R_1 ist abhängig vom Arbeitspunkt und der Aussteuerung des aktiven Zweipols.

²⁾ Seit über 50 Jahren wird die Betriebsgüte im deutschsprachigen Raum derart definiert. Vorsicht bei anderen Definitionen!

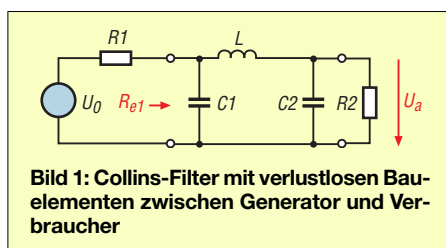


Bild 1: Collins-Filter mit verlustlosen Bauelementen zwischen Generator und Verbraucher

X_L lässt sich nach einer der drei folgenden Gleichungen berechnen:³⁾

$$X_L = \frac{X_{C1} + X_{C2}}{1 + \frac{X_{C2}}{Q_B R_2}} \quad (3a)$$

$$X_L = \frac{R_1 - R_2}{Q_B - \frac{R_2}{X_{C2}}} \quad (3b)$$

$$X_L = \frac{R_1 \left(Q_B + \sqrt{\frac{R_2}{R_1} (1 + Q_B^2)} - 1 \right)}{1 + Q_B^2} \quad (3c)$$

Daraus ergeben sich die Werte der Bauelemente zu

$$C_{1,2} = \frac{1}{2 \pi f_B X_{C1,2}}$$

und

$$L = \frac{X_L}{2 \pi f_B}$$

Da der Nenner in der Wurzel von Gl. (2) und der Zähler in Gl. (3c) nicht negativ werden dürfen, muss gelten

$$Q_B^2 \geq \frac{R_1}{R_2} - 1$$

Im Grenzfall

$$\frac{R_1}{R_2} = 1 + Q_B^2 \quad (1)$$

wird X_{C2} unendlich groß ($C_2 = 0$) und das Collins-Filter entartet zu einem Halbglied.

³⁾ bzw. Gl. (3c) auch als

$$X_L = R_1 \frac{R_2}{Q_B + \frac{R_2}{X_{C2}}} \frac{1}{1 + Q_B^2}$$

Mit den nach Gl. (1) bis (3c) berechneten Bauelementen⁴⁾ herrscht Leistungsanpassung, d. h. der Eingangswiderstand des verlustfreien und mit R_2 abgeschlossenen Collins-Filters ist (vom Eingang her gesehen) $R_{e1} = R_1$.⁵⁾ Der Innenwiderstand des Collins-Filters (von der Verbraucherseite her gesehen, R_1 angeschlossen) ist $R_{i2} = R_2$. Die dem aktiven Zweipol maximal entnehmbare Leistung liegt an R_2 . Die Selektion entspricht einem Bandpass mit Tiefpasscharakter, siehe [1].

■ Verlustbehaftetes Collins-Filter

Sind die Bauelemente des Collins-Filters verlustbehaftet, so sind beide Beziehungen für R_{e1} und R_{i2} zusammen nicht erzielbar. Daraus kann geschlossen werden, dass ein optimaler Wirkungsgrad der Gesamtanordnung nur erreicht wird, wenn sowohl R_{e1} von R_1 als auch R_{i2} von R_2 abweichen. Das heißt, es wird eine Fehlanpassung an beiden Seiten angestrebt werden müssen und nicht nur eine Anpassung an einer Seite. Diese Vorüberlegungen sollen nachfolgend durch eine Berechnung erweitert werden. Es sei ein Collins-Filter nach Bild 2 mit verlustbehafteter Induktivität gegeben, die durch die Spulengüte Q_L bei der Betriebsfrequenz f_B charakterisiert ist. Somit ist

$$r_L = \frac{2 \pi f_B L}{Q_L}$$

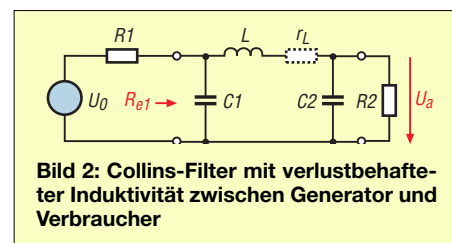


Bild 2: Collins-Filter mit verlustbehafteter Induktivität zwischen Generator und Verbraucher

Es sei $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ und $R_2 = 50 \Omega$. Q_B wird mit 20 vorgegeben, das bedeutet $X_{C1} = 50 \Omega$. Alle diese Größen und Q_L werden konstant gehalten. Das Filter soll auf maximalen Wirkungsgrad η_{max} (an R_2 maximal entnehmbare Leistung zu maximal entnehmbarer Leistung am aktiven Zweipol)

$$\eta_{max} = \frac{|U_{a,max}|^2}{\frac{R_2}{4 R_1} U_0^2} \quad (4)$$

durch Variation von X_L und X_{C2} abgestimmt werden.

⁴⁾ Im gesamten möglichen R_1 -Bereich, also von 0 bis $R_2 \cdot (1 + Q_B^2)$, verlaufen C_1 , L und C_2 stetig. Bei $R_1 = R_2$ sind beide Kapazitäten gleich groß, ebenso bei $R_1 = R_2 Q_B^2$. Der letztere Sonderfall ist i. Allg. für die Praxis uninteressant, weil Q_B nicht frei gewählt werden kann.

⁵⁾ Derart lassen sich die Gl. (2), (3a) und (3b) gewinnen.

Dazu wird die (aus der Vierpolmatrix abgeleitete) Gleichung

$$\frac{1}{\eta} = \frac{1}{4} \left\{ \left[r_L \left(\frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}} - \frac{\sqrt{R_1 R_2}}{X_{C1} X_{C2}} \right) + \left(1 - \frac{X_L}{X_{C2}} \right) \sqrt{\frac{R_2}{R_1}} + \left(1 - \frac{X_L}{X_{C1}} \right) \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} \right]^2 + \left[r_L \left(\frac{1}{X_{C2}} \sqrt{\frac{R_2}{R_1}} + \frac{1}{X_{C1}} \sqrt{\frac{R_1}{R_2}} \right) + \frac{X_L}{\sqrt{R_1 R_2}} + \frac{X_{C1} + X_{C2} - X_L}{X_{C1} X_{C2}} \sqrt{R_1 R_2} \right]^2 \right\} \quad (5)$$

mit einem Rechner berechnet und X_L und X_{C2} variiert, bis η_{max} erreicht wird.⁶⁾ Die η_{max} -Werte sind in Abhängigkeit von der Spulengüte in Bild 3 aufgetragen. Es ergeben sich Eingangswiderstände R_{e1} , die

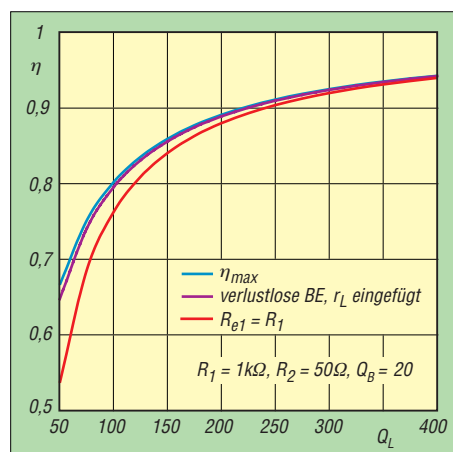


Bild 3: Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Spulengüte für unterschiedlich berechnete X_L und X_{C2} bei $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 50 \Omega$, $Q_B = 20$, d. h. $X_{C1} = 50 \Omega$; Parameter: Filterberechnung auf η_{max} ; ohne Bauelementeverluste berechnet, r_L eingefügt; $R_{e1} = R_1$

Die Blindwiderstände X_{C2} und X_L , die sich für η_{max} und für $R_{e1} = R_1$ ergeben, sind in Tabelle 2 als relative Abweichungen zu denen, die sich im verlustfreien Fall ergeben, aufgeführt. Sie unterscheiden sich besonders in X_{C2} .

Als ein Näherungs-Abgleichfall kann betrachtet werden, dass in einem verlustfreien Filter⁸⁾ die verlustfreie Induktivität durch eine verlustbehaftete Induktivität ersetzt wird.⁹⁾ In Bild 3 sind die sich dabei ergebenden Wirkungsgrade („verlustfreie Bauelemente (BE), r_L eingefügt“) dargestellt. Aus Tabelle 1 sind die entsprechenden Eingangswiderstände R_{e1} ersichtlich.

Bild 3 zeigt, dass dieser Einfugefall der Abstimmung auf η_{max} ziemlich nahe kommt. Aus Tabelle 2 geht hervor, dass bei Spulenguten $Q_L > 100$ die X_{C2} -Werte keine größeren relativen Abweichungen als etwa 10 % von denen des verlustfreien Falls aufweisen. Besonders gering sind die Abweichungen von X_L . Das würde erlauben, für „vernunftige“ Q_L -Werte die Bauelemente mit den relativ einfachen Gl. (1) bis (3) zu berechnen. Dabei sollte die Induktivität auf ihren

Eine Variation aller drei Filter-Bauelemente auf η_{max} bei verlustbehafteter Induktivität ist sinnlos, weil sie auf die Einstellung eines minimal realisierbaren C_2 und somit zu einem schlechten Selektionsverhalten führt.

■ Parasitäre Effekte

Bei der o. a. Berechnung ist die Eigenkapazität der Induktivität nicht berücksichtigt. Sie sollte kapazitatsarm ausgeführt werden (großes Verhältnis Länge l zu Durchmesser d). Da diese Forderung der nach verlustarmem Aufbau (kleines l/d) widerspricht, gilt es experimentell einen Kompromiss für die Spulengeometrie zu finden. Besondere Bedeutung kommt der kapazitätsarmen Gestaltung der Spulenschalter bei Mehrbandbetrieb zu. Die Parallelresonanz der Spulen- und Schaltereinheit soll nach Möglichkeit weit über der Betriebsfrequenz liegen. Da eine gute Dämpfung höherfrequenter Leistungsanteile nur unterhalb der Parallelresonanz der Spule gewährleistet ist, bleibt der Einsatz eines nachgeschalteten Tiefpassfilters empfehlenswert, um eine gute Weitabselektion zu erzielen.

Tabelle 1: Eingangswiderstand R_{e1} in Abhängigkeit von der Spulengüte Q_L und der Berechnungsart des Filters ($R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 50 \Omega$, $Q_B = 20$, d. h. $X_{C1} = 50 \Omega$)

Q_L	Berechnungsart η_{max}		ohne BE-Verluste, r_L eingefügt		$R_{e1} = R_1$	
	$ R_{e1} $ [Ω]	φ [°]	$ R_{e1} $ [Ω]	φ [°]	$ R_{e1} $ [Ω]	φ [°]
25	351	-4,07	509	-4,19	1000	0
50	524	-2,23	674	-2,33	1000	0
100	690	-1,21	805	-1,26	1000	0
200	817	-0,65	892	-0,66	1000	0
400	900	-0,34	943	-0,34	1000	0
∞	1000	0	1000	0	1000	0

Tabelle 2: Relative Abweichung der BE-Blindwiderstände in Abhängigkeit von der Spulengüte und der Berechnungsart des Filters ($R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 50 \Omega$, $Q_B = 20$, d. h. $X_{C1} = 50 \Omega$)

Q_L	Berechnungsart η_{max}		ohne BE-Verluste, r_L eingefügt		$R_{e1} = R_1$	
	$\frac{\Delta X_L}{X_L}$ [%]	$\frac{\Delta X_{C2}}{X_{C2}}$ [%]	$\frac{\Delta X_L}{X_L}$ [%]	$\frac{\Delta X_{C2}}{X_{C2}}$ [%]	$\frac{\Delta X_L}{X_L}$ [%]	$\frac{\Delta X_{C2}}{X_{C2}}$ [%]
25	5,1	38,0	0	0	-11,2	-64,1
50	2,9	19,9	0	0	-4,7	-27,7
100	1,5	10,3	0	0	-2,2	-13,3
200	0,8	5,2	0	0	-1,1	-6,5
400	0,4	2,6	0	0	-0,5	-3,2
∞	0	0	0	0	0	0

für abnehmende Spulengüte immer mehr von $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ abweichen und sogar komplex werden (Tabelle 1). Aus diesem Grunde wird der Wirkungsgrad η für ein Filter, dessen Eingangswiderstand $R_{e1} = R_1$ ist, geringer sein (Bild 3).⁷⁾

nach Gl. (3) berechneten Sollwert abgeglichen werden, ehe sie eingebaut und das Filter auf η_{max} abgestimmt wird.¹⁰⁾

Literatur

[1] Doberenz, W., Y24HK; Peuker, H., Y22ML: Zur Theorie und Berechnung von Collinsfiltern. FUNK-AMATEUR (1980) H. 9, S. 452-455

⁶⁾ Mathematisch entspricht das einer Extremwertermittlung von η durch partielle Differentiation nach beiden Elementen X_{C2} und X_L . Es ergeben sich zwei Gleichungen, deren Schnittpunkte die gesuchten optimalen Werte X_{C2} und X_L sind. Für verlustlose Bauelemente ($\eta = 1$) lassen sich dergl. Gl. (2) und (3c) ableiten.

⁷⁾ Der Wirkungsgrad hat eine Nullstelle bei endlicher Spulengüte $Q_L = Q_B$; C_2 wird dabei ∞. Für $Q_L < Q_B$ kann ein derartiges Filter in dieser Konfiguration nicht realisiert werden.

⁸⁾ Für ein verlustloses Collins-Filter wird aus Gl. (5)

$$\eta = \frac{4R_1 R_2 X_{C1}^2 X_{C2}^2}{[X_{C1} X_{C2} (R_1 + R_2) - X_L (X_{C1} R_2 + X_{C2} R_1)]^2 + [R_1 R_2 (X_{C1} + X_{C2}) + X_L (X_{C1} X_{C2} - R_1 R_2)]^2}$$

Die richtig dimensionierten C_2 und L (und evtl. weitere Formeln, die sich nicht einfach ineinander überführen lassen) müssen bei der Betriebsfrequenz f_B einen Wirkungsgrad $\eta_{max} = 1$ ergeben. Sonst sind sie falsch.

⁹⁾ Die Bauelemente C_1 , C_2 und L werden nach Gl. (1) bis (3) berechnet und r_L eingefügt. Das Filter wird nicht nachgestimmt.

¹⁰⁾ Dabei muss man in Kauf nehmen, dass C_1 und C_2 von denen der einfachen Berechnung abweichen.