

Bericht

**Entwurf eines LC-Bandpasses mit
1 % relativer Bandbreite mit QuickFil**

10. Dezember 1999

Hans Gall
BAUSCH-GALL GmbH
www.Bausch-Gall.de

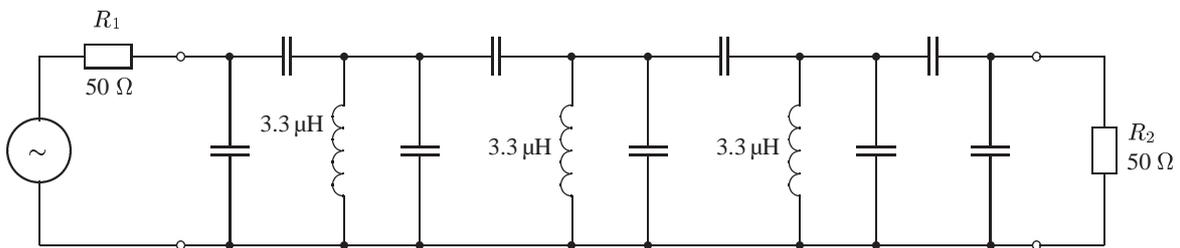
Aufgabenstellung

Bei der automatischen Berechnung von schmalbandigen LC-Bandpässen mit QuickFil [1] erhält man Elementewerte, die nicht realisierbar sind. In diesem Bericht zeigen wir, wie man durch Anwendung der Norton-Transformation eine brauchbare Filterschaltung erhalten kann.

Als Beispiel wollen wir einen LC-Bandpaß mit folgenden Daten entwerfen:

Mittenfrequenz	f_0	=	5.000 MHz
untere Durchlaßgrenze	f_{-D}	=	4.975 MHz
obere Durchlaßgrenze	f_{+D}	=	5.025 MHz
Bandbreite	Δf	=	50 kHz
relative Bandbreite	$\frac{\Delta f}{f_0} \cdot 100\%$	=	1.0 %
theoretische maximale Dämpfungswelligkeit im Durchlaßbereich (Tschebyscheff)	a_{\max}	=	0.1 dB
Quell- und Lastwiderstand	$R_1 = R_2$	=	50 Ω

Das Filter soll aus drei kapazitiv gekoppelten Parallelschwingkreisen bestehen (Cohn-Filter, [2]), da eine solche Schaltung für schmalbandige Bandpässe erfahrungsgemäß besonders geeignet ist. Um die Fertigung zu vereinfachen, sollen alle Spulen den Wert 3.3 μH erhalten.



Lösung

Zunächst schätzen wir den Einfluß der Bauelementeverluste ab. Diese wirken sich bei schmalbandigen Bandpässen besonders stark aus. Nach einer Faustformel in [3], S.21 kann man ein "sehr gutes" Bandpaßfilter bauen, wenn man Schwingkreise mit einer Güte

$$Q \geq 20 \dots 25 \cdot \frac{f_0}{\Delta f}$$

verwenden kann. Mit unseren Daten und Faktor 20 erhalten wir

$$Q \geq 20 \cdot \frac{5 \text{ MHz}}{50 \text{ kHz}} = 2000$$

Mit realisierbaren Spulengüten $Q_L \approx 300$ (Ringkernspulen mit Pulvereisenkern) und Kondensatorgüten $Q_C \approx 2000$ (StyroflexC) erhalten wir Kreisgüten weit unter 2000. Deshalb müssen wir bei einem mit solchen Bauelementen aufgebauten Bandpaß mit einer großen Einfügungsdämpfung rechnen. Die obige Spezifikation enthält hierfür keine Forderung. Möglich wäre z.B. ein Dämpfungsausgleich durch einen vor- oder nachgeschalteten Verstärker.

Bei der Eingabe für QuickFil müssen wir berücksichtigen, daß die Schaltung bereits vollständig gegeben ist. Da zur Ankopplung am Ein- und Ausgang kapazitive Spannungsteiler verwendet werden sollen, müssen wir den parametrischen Bandpaßtyp [1] wählen. Für den dabei auftretenden freien Parameter können wir die Vorbesetzung akzeptieren.

Für die Vielfachheit der Sperrstellen bei $f = 0$ und $f = \infty$ ermitteln wir aus der Schaltung:

$$\begin{aligned} n_0 &= 7 \\ n_\infty &= 1 \\ n_f &= 0 \end{aligned}$$

Die Schaltung enthält keine Sperr- oder Saugkreise, deshalb ist $n_f = 0$. Für den Gesamtfiltergrad erhalten wir also:

$$n = n_0 + n_\infty + 2 \cdot n_f = 8$$

Mit diesen Daten können wir die QuickFil-Eingabe in den Menüs Filterart (Filtertyp=Bandpaß, Approximation=Equal Ripple) und Forderungen durchführen. Wir erhalten folgendes Approximationsergebnis:

```

Bandpass mit einer relativen Bandbreite von 1%
-----
Equal Ripple - Bandpaß

Bandpaßart           :      parametrisch
Parameter            :      4.999937 MHz

untere Durchlaßgrenzfrequenz :      4.975000 MHz
obere Durchlaßgrenzfrequenz  :      5.025000 MHz

Durchlaßdämpfung      :      0.100000 dB
Rückflußdämpfung      :      16.43 dB
Reflexionsfaktor      :      15.09 %

Ordnung               :      8
Pole bei Null         :      7
Pole bei Unendlich    :      1

fixe Polpaare         :      0
variable Polpaare     :      0

untere 3dB Grenzfrequenz :      4.965448 MHz
obere 3dB Grenzfrequenz  :      5.034901 MHz

Filtergüte            :      208.81

```

bsp5.spz

Der freie Parameter der parameterischen Bandpaßart wurde auf das geometrische Mittel der Durchlaßgrenzfrequenzen gesetzt ($\sqrt{4.975 \text{ MHz} \cdot 5.025 \text{ MHz}} = 4.999937 \text{ MHz}$). Die theoretischen Rückflußdämpfungs- und Reflektionsfaktorwerte wurden aus der Durchlaßdämpfung 0.1 dB berechnet. Die Filtergüte von 208.81 ermittelt QuickFil als maximale Polgüte der Nullstellen des Nennerpolynoms $e(s)$ der Übertragungsfunktion $H(s)$. Dieser Wert kann man nach [1], S. 6-10, 6-17 zur Abschätzung der Verluste im Durchlaßbereich verwenden, denn die Spulengüten sollten um den Faktor 3 bis 5 größer sein als diese Filtergüte ($3 \cdot 208.81 = 626.4$, $5 \cdot 208.81 = 1044$). Aus den 3 dB-Grenzfrequenzen berechnet sich eine belastete Bandpaßgüte von $Q_{\text{bel}} = 5 \text{ MHz} / (5.0349 \text{ MHz} - 4.9655 \text{ MHz}) = 72.1$.

Im Menü `Passiv-Design` erhalten wir:

bsp51.sch

Bandpass mit einer relativen Bandbreite von 1%

```
-----
1 ....R....      50.000000 Ohm
.               .
2 .             C      642.799344 pF
.               .
3 ....L....      30.415908 nH
.               .
4 .             C      32.996104 nF
.               .
5 ....L....      2.606776 pF
.               .
6 .             C      388.680131 uF
.               .
7 ....C....      4.578099 F
.               .
8 ....L....      219.200445 aH
.               .
9 .             C      89.193823 mF
.               .
10 ....R....      360.338488 nOhm
```

Diese automatisch erzeugte kanonische Schaltung aus 8 Blindelementen realisiert die Übertragungsfunktion vom Grad 8 mit der minimal möglichen Zahl von Schaltelementen, ist aber wegen der extremen Elementwerte nicht realisierbar. Wie sich zeigen wird, können wir die Schaltung schrittweise verbessern. Wir speichern sie zunächst mit dem Befehl (`S`) `Schaltung speichern` im Menü `Manipulation und Analyse` unter dem Dateinamen `bsp51.sh` ab. Damit steht die Schaltung immer wieder zur Verfügung, falls sich bei den folgenden Transformationsschritten Schwierigkeiten ergeben sollten. Für den Befehl (`L`) `Schaltung laden` im Menü `Manipulation und Analyse` speichert QuickFil die Schaltungen mit der Namens Erweiterung `.sh` im Binärformat ab. Die Namens Erweiterung `.sch` verwendet QuickFil für die ASCII-Druckdateien der Schaltbilder (siehe oben `bsp51.sch`).

Um zu der gewünschten Schaltung mit drei kapazitiv gekoppelten Parallelschwingkreisen zu kommen, müssen wir zu den Induktivitäten L_3 und L_5 noch je eine Kreiskapazität hinzufügen. Dies können wir durch zwei Norton-Transformationen erreichen. Die Induktivität $L_3 = 30.415908 \text{ nH}$ läßt sich dadurch aber nicht verändern, da die Transformationen in der Schaltung nur nach "hinten", d.h. zum Lastwiderstand R_{10} hin, wirken. Wir erhöhen deshalb zunächst das Impedanzniveau der ganzen Schaltung so, daß L_3 den Wert $3.3 \mu\text{H}$ erhält. Hierzu müssen wir den Quell- und Lastwiderstand ändern auf:

$$R = \frac{3.3 \mu\text{H}}{30.415908 \text{ nH}} \cdot 50 \Omega = 108.495857 \cdot 50 \Omega = 5424.792842 \Omega$$

Die sechs Dezimalstellen führen wir nur mit, um exakte Zahlenwerte zu erhalten. Bei der normalen Anwendung von QuickFil brauchen Sie natürlich nicht so viele Stellen anzugeben.

Durch die Erhöhung der Quell- und Lastwiderstände erhalten wir ein "hochohmigeres" Filter. Die Impedanz aller Netzwerkzweige wird um den Faktor 108.5 erhöht, d.h. alle Induktivitätswerte werden mit diesem Faktor multipliziert bzw. alle Kapazitätswerte dividiert. Hierdurch bleibt die Betriebsgüte und damit die Bandbreite des Bandpasses erhalten.

Im Menü `Passiv-Design` geben wir den Befehl (`W`) `Abschluß-Widerstand` ein und ändern den Bezugswiderstand beidseitig auf 5424.792842Ω .

Damit erhalten wir folgende Schaltung mit geänderten Elementewerten:

bsp52.sch

Bandpass mit einer relativen Bandbreite von 1%

```

-----
1 ....R....      5.424793 kOhm
  .             .
2 .             C      5.924644 pF
  .             .
3 ....L....      3.300000 uH
  .             .
4 .             C      304.123171 pF
  .             .
5 ....L....      282.824450 pH
  .             .
6 .             C      3.582442 uF
  .             .
7 ....C....      42.196069 mF
  .             .
8 ....L....      23.782340 fH
  .             .
9 .             C      822.094274 uF
  .             .
10 ....R....      39.095233 uOhm

```

Den geforderten Quell- und Lastwiderstand von jeweils 50Ω werden wir später wiederherstellen. Unser Zwischenergebnis speichern wir mit dem Dateinamen `bsp52.sh` ab.

Als nächstes führen wir eine Norton-Transformation mit C_6 und C_7 durch. Hierbei entsteht als zusätzliche Kapazität das fehlende Kreis-C parallel zu L_5 . Dabei wählen wir das Transformationsverhältnis so, daß L_8 den gleichen Wert wie L_5 erhält. Im Menü `Manipulation und Analyse` wählen wir `(N)` und stellen fest, daß C_6 und C_7 bereits markiert sind. Nach Wahl von `(E)` geben wir `8` ein, da wir den Sollwert für L_8 setzen müssen. Nach Wahl von `(G)` geben wir mit `282.824450p` den Wert von L_5 ein. QuickFil berechnet daraus den Sollfaktor `11.892204k` als Transformationsverhältnis für die Norton-Transformation. Wir geben den Befehl `(H) Automatische Nortontransformation` ein und es entsteht die neue Kapazität C_8 .

Da die sich ergebende T-Schaltung aus C_6 , C_7 und C_8 für unsere Schaltung nicht geeignet ist, gehen wir mit `Q` zurück zum Menü `Manipulation und Analyse` und wählen `(P) PI-TEE Transformation`. Wir sehen, daß C_6 , C_7 und C_8 bereits markiert sind, geben `(T)` ein und erhalten die gewünschte PI-Schaltung.

Wir gehen mit `Q` zurück und wählen `(A)` um die Schaltung auszugeben. L_8 ist zu L_9 geworden, welche jetzt den Wert von `282.824450pH` haben muß. Falls dies nicht der Fall ist, ist ein Fehler passiert und wir müssen diesen Bearbeitungsschritt wiederholen.

In der neuen Schaltung auf der folgenden Seite sind jetzt L_5 und L_9 gleich groß.

bsp53.sch

Bandpass mit einer relativen Bandbreite von 1%

```

-----
1 ....R....          5.424793 kOhm
  .           .
2 .           C          5.924644 pF
  .           .
3 ....L....          3.300000 uH
  .           .
4 .           C          304.123171 pF
  .           .
5 ....L....          282.824450 pH
  .           .
6 ....C....          3.549591 uF
  .           .
7 .           C          32.850955 nF
  .           .
8 ....C....          3.515663 uF
  .           .
9 ....L....          282.824450 pH
  .           .
10 .           C          69.128838 nF
  .           .
11 ....R....          464.928502 mOhm

```

Wir speichern zunächst dieses Zwischenergebnis mit dem Dateinamen `bsp53.sh` ab. Bevor wir den obigen Transformationsschritt wiederholen können, vertauschen wir die Reihenfolge von L_5 und C_6 damit die Norton-Kapazitäten zwischen die beiden Induktivitäten zu liegen kommen. Hierzu wählen wir im Menu `Manipulation` und `Analyse` den Befehl (T) `Vierpole tauschen` und sehen, daß L_5 und C_6 bereits markiert sind. Wir wählen (T) und gehen mit Q zurück. Jetzt führen wir die Transformation nochmal wie oben durch, wobei wir bei (E) 6 für L_6 und bei (G) für den Sollwert $3.3 \mu\text{H}$ eingeben müssen. Damit erhalten wir folgende transformierte Schaltung mit $L_3 = L_7 = L_{10} = 3.3 \mu\text{H}$:

bsp54.sch

Bandpass mit einer relativen Bandbreite von 1%

```

-----
1 ....R....          5.424793 kOhm
  .           .
2 .           C          5.924644 pF
  .           .
3 ....L....          3.300000 uH
  .           .
4 ....C....          301.307700 pF
  .           .
5 .           C          2.815471 pF
  .           .
6 ....C....          301.426102 pF
  .           .
7 ....L....          3.300000 uH
  .           .
8 .           C          2.815471 pF
  .           .
9 ....C....          301.307699 pF
  .           .
10 ....L....          3.300000 uH
  .           .
11 .           C          5.924644 pF
  .           .
12 ....R....          5.424793 kOhm

```

Diese Schaltung speichern wir mit dem Namen `bsp54.sh` ab. Jetzt müssen wir nur noch den Quell- und Lastwiderstand auf 50Ω transformieren. Am Ausgang verwenden wir dazu C_9 und C_{11} für die Norton-Transformation und gehen wie oben vor. Anschließend drehen wir das Filter mit dem Befehl (U) im Menü `Manipulation und Analyse` um und führen eine letzte Norton-Transformation durch.

Wir erhalten damit die endgültige Schaltung:

bsp56.sch

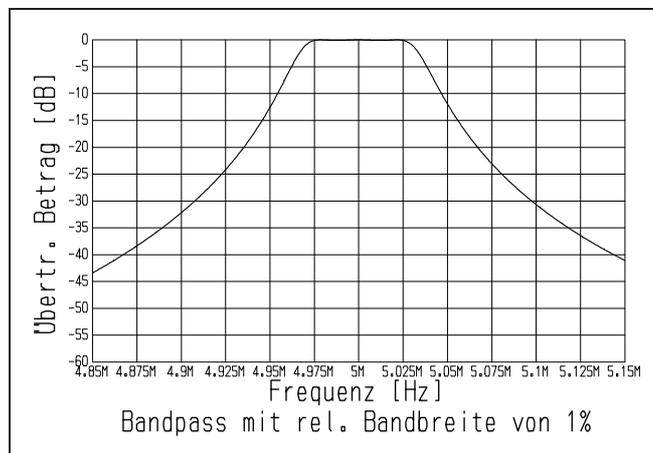
Bandpass mit einer relativen Bandbreite von 1%

```

-----
1 ....R....      50.000000  Ohm
.               .
2 ....C....      581.087454  pF
.               .
3 .             C      61.711890  pF
.               .
4 ....C....      245.520453  pF
.               .
5 ....L....      3.300000   uH
.               .
6 .             C      2.815471  pF
.               .
7 ....L....      3.300000   uH
.               .
8 ....C....      301.426102  pF
.               .
9 .             C      2.815471  pF
.               .
10 ....L....     3.300000   uH
.               .
11 ....C....     245.520454  pF
.               .
12 .             C      61.711890  pF
.               .
13 ....C....     581.087454  pF
.               .
14 ....R....     50.000000  Ohm
    
```

Jetzt prüfen wir noch, ob bei unseren Transformationen kein Fehler unterlaufen ist. Da wir nur Äquivalenztransformationen durchgeführt haben, d.h. solche bei denen die Übertragungsfunktion unverändert bleibt, muß die Dämpfung an den Durchlaßgrenzen immer noch 0.1 dB betragen. Mit dem Befehl (Y) im Menü `Manipulation und Analyse` erhalten wir folgenden Dämpfungsverlauf für die Güten $Q_L \rightarrow \infty$ und $Q_C \rightarrow \infty$:

bsp56.eps



Mit dem Cursor ermitteln wir für die Dämpfung bei 4.975 und 5.025 MHz jeweils $a = 0.1$ dB. Damit sind wir sicher, daß der Frequenzgang der transformierten Schaltung stimmt.

Zur Abschätzung des Einflusses der Bauelementverluste berechnen wir die Dämpfungen bei den Bandgrenzen und der Mittenfrequenz und erhalten für die gewählten Güterwerte folgende Tabelle:

Q_L	Q_C	$a_{4.975 \text{ MHz}} \text{ (dB)}$	$a_{5.000 \text{ MHz}} \text{ (dB)}$	$a_{5.025 \text{ MHz}} \text{ (dB)}$
200	800	10.2	8.4	10.1
250	1000	8.5	6.8	8.4
300	1500	7.1	5.5	7.0
350	2000	6.1	4.6	6.0
2000	2000	2.1	1.4	2.0
4000	4000	1.1	0.7	1.1

Abschließende Bemerkungen

Bei einem Aufbau für kleine Stückzahlen, z.B. für Meßgeräte, könnte $Q_L \approx 350$ (Ringkernspulen mit Pulvereisenkern) und $Q_C \approx 2000$ (Styroflex-C) erreicht werden. Jeder Bandpaß müßte einzeln von Hand abgeglichen werden, was die Fertigung teuer machen würde. Bezüglich der Einfügungsdämpfung stellen wir fest, daß eine relative Bandbreite von 1 % etwa die untere Grenze dessen ist, was man mit LC-Bandpässen noch sinnvoll realisieren kann. Für noch schmalere Bandpässe kommen je nach Frequenzbereich nur Quarz-, keramische oder Oberflächenwellenfilter in Frage.

Vor dem Aufbau der Schaltung `bSP56.sch` wäre noch der Einfluß der Temperaturdrift bei den Schwingkreisen zu untersuchen. Das Pulvereisenmaterial Nr. 6 (Carbonyl-SF) von MICROMETALS [4] hat z.B. einen Temperaturkoeffizienten von +35 ppm/K, der mit den Kreiskondensatoren kompensiert werden müßte.

Die Koppelkondensatoren C_6 und C_9 in `bSP56.sch` sind mit 2.82 pF schon recht klein, könnten aber durch zwei in Reihe geschaltete 5.6 pF-Kondensatoren ersetzt werden.

Nachteilig an der Schaltung ist der stark unsymmetrische Sperrdämpfungsverlauf, der sich durch die ungleichen Teilgrade $n_0 = 7$ und $n_\infty = 1$ ergibt. Nach hohen Frequenzen hin werden die Reaktanzen der Kreisspulen größer und immer weniger wirksam, so daß die Schaltung dort nur noch wie ein kapazitiver Spannungsteiler wirkt. Für einen arithmetisch-symmetrischen Sperrdämpfungsverlauf wäre erfahrungsgemäß $n_\infty \approx 3 \cdot n_0$ erforderlich, was nur mit überwiegend induktiver Kopplung möglich wäre.

Bandpässe aus kapazitiv gekoppelten Schwingkreisen haben seit langem in der HF-Technik eine große Bedeutung. Bis ins Mikrowellengebiet werden Bandpässe aus gekoppelten Resonatoren gebaut, deren Entwurf besonders in [5] ausführlich beschrieben sind. Wegen der Wichtigkeit dieses Filtertyps sind eine Vielzahl von Dimensionierungsprogrammen entstanden. Diese gehen meist von den von Cohn in [2] beschriebenen Näherungen aus und sind deshalb auf relative Bandbreiten bis etwa 20 % beschränkt. Die hier gezeigte QuickFil-Synthese ist demgegenüber exakt, da keine Näherungen verwendet werden. Die Berechnungsmethode ist deshalb auch für Bandbreiten größer als 20 % uneingeschränkt verwendbar.

Literatur

- [1] "QuickFil", Software für die Nachrichtentechnik und Elektronik, Filterberechnung,
Copyright: OMICRON electronics 1987 – 1994,
Version 5.0, Benutzerhandbuch,
OMICRON electronics GmbH,
Brolsstraße 39, A-6844 Altach, Österreich,
Telefon 0043/5576/79200-0, Telefax 0043/5576/79200-9
- [2] Seymour B. Cohn,
"Direct-Coupled-Resonator Filters",
Proceedings of the IRE, February 1957,
S. 187–196
- [3] Anatol I. Zverev,
"Handbook of Filter Synthesis",
John Wiley and Sons, Inc., New York, 1967,
ISBN 0 471 98680 1
- [4] "MICROMETALS IRON POWDER CORES,
RF APPLICATIONS, ISSUE G", NOVEMBER 1997,
MICROMETALS, 5615 E. La Palma, Anaheim, CA 92807, U.S.A.
Telefon 001/714/970-9400, Telefax 001/714/970-0400
Vertretung in Deutschland:
BFI-IBEXSA Elektronik GmbH, Assar-Gabrielsson-Str. 1, 63128 Dietzenbach,
Telefon 06074/4098-0, Telefax 06074/4098-10,
email GER_IPE@bfi.avnet.com
- [5] George L. Matthaei, Leo Young, E.M.T. Jones,
Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures,
Reprint of Edition published by McGraw-Hill Book Company, Inc., 1964,
ARTECH House, Dedham, Mass., 1980,
SBN 0-89006-099-1