

## Ladderfilter, die Welt der Schleifen

Obwohl das Thema Quarz-Ladderfilter mittlerweile ziemlich ausgeknautscht ist, kann man immer wieder in verschiedenen Veröffentlichungen sehr unterschiedliche Auffassungen über das Verhalten der Filterimpedanz im Sperr- und Durchlassbereich lesen. Die einen konstatieren, dass ein solches Filter im Durchlassbereich induktiv ist, andere behaupten das Gegenteil (kapazitives Verhalten).

Da nun die Filterdiskussion mit etwas anderen Schwerpunkten im Amateurfunk-Forum von Volker, SM5ZBS wiederbelebt wurde, habe ich in diesem Zusammenhang noch einige Simulationen und zum Teil auch Messungen an noch vorhandenen Filteraufbauten durchgeführt und hier dokumentiert. Exakte Aussagen über das Verhalten der Filter lassen sich nur unter Berücksichtigung von Betrag und Phase machen. Dazu ist die Darstellung als Ortskurven (Smith-Diagramm) erforderlich. Ein skalarer Netzwerkanalysator ist daher für diesen Zweck nicht geeignet. Deswegen wurde ein Vektor-Netzwerkanalysator (VNA) für die Messungen eingesetzt.

Ich möchte aber zur Beruhigung aller Bastler ausdrücklich darauf hinweisen, dass für den erfolgreichen Bau von Ladderfiltern und die Messung von Durchlasskurve und Reflexion (Anpassung) ein skalarer NWA wie z.B. der NWT vollkommen ausreicht.

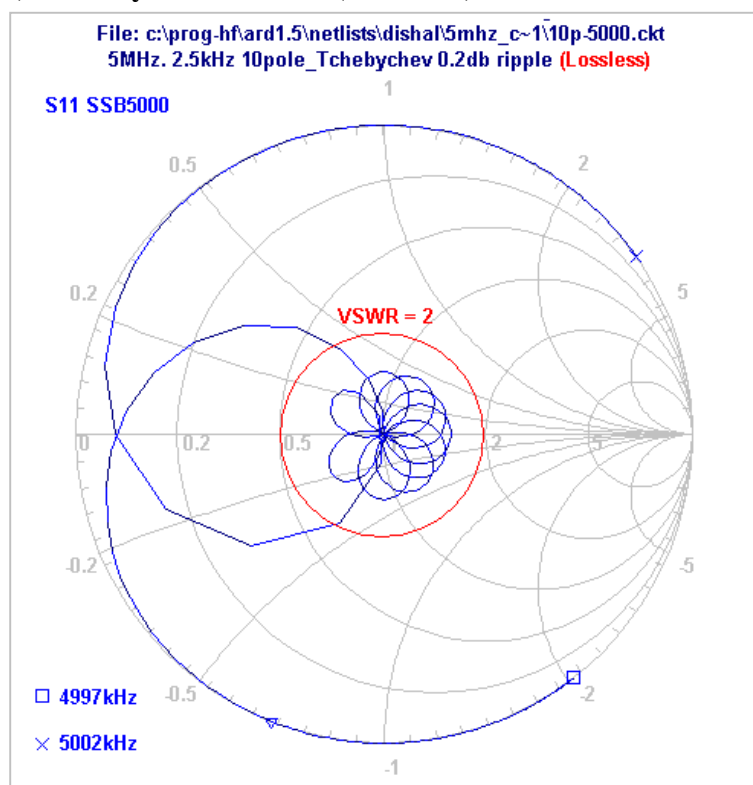
Auch die folgenden Betrachtungen sind für die Praxis eigentlich überflüssig. Sie sind daher nur für diejenigen interessant, die ein bisschen neugierig sind und Spaß an solchen Spielchen haben. Die Simulationen wurden für die vier wichtigsten Filterarten durchgeführt, nämlich:

### **Tschebyscheff, Butterworth, Cohn (constant-k) und Quasi-Equi-Ripple (QER)**

Mit der Ausnahme eines Tschebyscheff-Filters standen außerdem noch aufgebaute Filter aus meinen anderen Versuchen [1], [2] für zusätzliche Messungen zur Verfügung.

Der in allen Bildern gezeigte rote Kreis für  $V_{SWR}=2$  entspricht einer Reflexionsdämpfung von ca. 9,5db, bzw. einer resultierenden Welligkeit von 0,5db.

#### 1) Tschebyscheff-Version (verlustlos)



Das ist die simulierte Ortskurve im Smith-Diagramm für ein 10-poliges Filter bei 5 MHz Mittenfrequenz und mit als verlustlos angenommenen Resonatoren. Für die Berechnung nach Dishal und die Simulation wurde eine Bandbreite von 2,5kHz und eine Welligkeit von 0,2db zugrundegelegt.

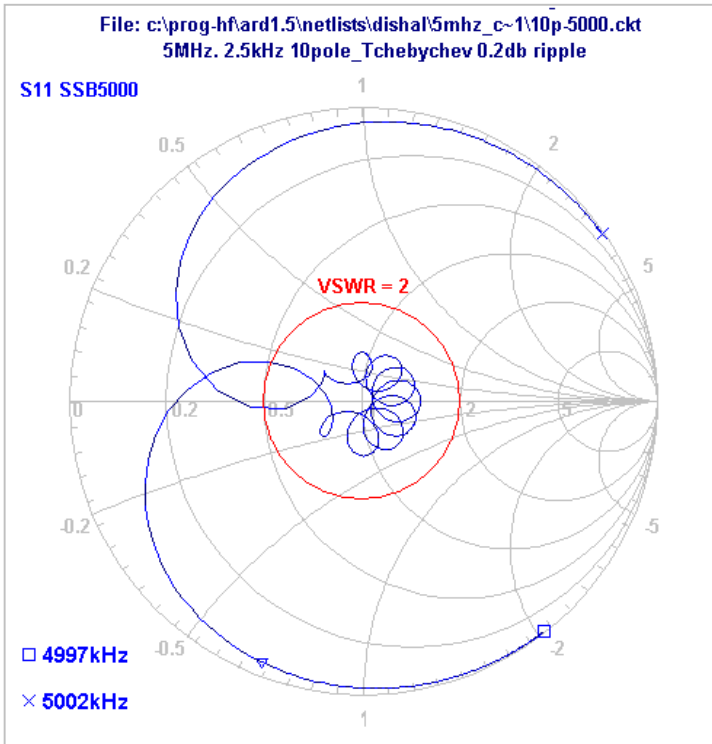
Man kann sehen, dass das Filter im Sperrbereich unterhalb der Filterfrequenz kapazitiv und oberhalb davon induktiv wirkt.

Im Durchlassbereich entstehen kleine, recht symmetrisch angeordnete Schleifen der Impedanz, die ständig zwischen der kapazitiven und der induktiven Seite wechseln und damit auch die Realebene kreuzen.

Entsprechend der Polzahl (10) ergeben sich 10 Schleifen – 9 kleine im Durchlassbereich selbst und zwei größere halbe im Übergang zwischen dem Durchlass- und Sperrbereich.

Die Größe der Schleifen und ihre Abweichung von der  $50\Omega$  Systemimpedanz definiert die Welligkeit im Durchlassbereich. Auffällig ist die extrem schnelle Änderung der Impedanz im Übergang zwischen Durchlass- und Sperrbereich (Schrittweite nur 10Hz!).

1a) Tschebyscheff mit verlustbehafteten Resonatoren



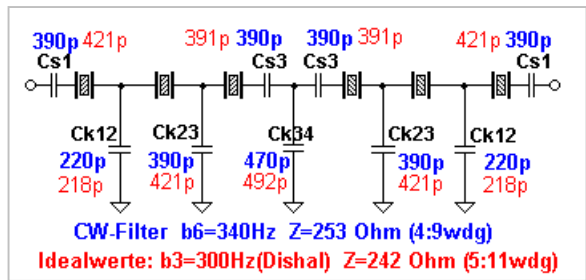
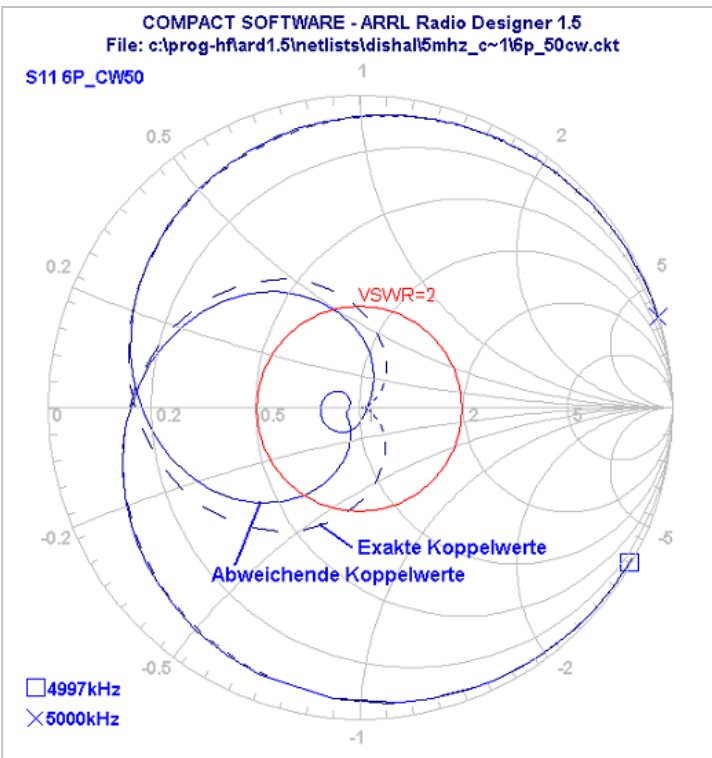
Hier wurde das gleiche Filtermodell simuliert, aber diesmal sind die Quarze nicht verlustlos, sondern besitzen eine Güte  $Q_u$  von ca. 150000.

Man sieht, dass einige der Schleifen zu Winzlingen entartet sind und auch der Übergang zwischen Durchlass- und Sperrbereich wesentlich kleinere Impedanzänderungen aufweist.

In der Durchlasskurve macht sich das durch eine Verringerung der Welligkeit und eine Verrundung der Filterschultern bemerkbar. Weiterhin erreichen die Kurven im Sperrbereich deutlich später den rein kapazitiven bzw. induktiven Außenkreis.

Leider stand kein Filter mehr für eine Messung zur Verfügung. Das ist aber bei den nächsten Filtertypen glücklicherweise der Fall.

2) Butterworth – Filter



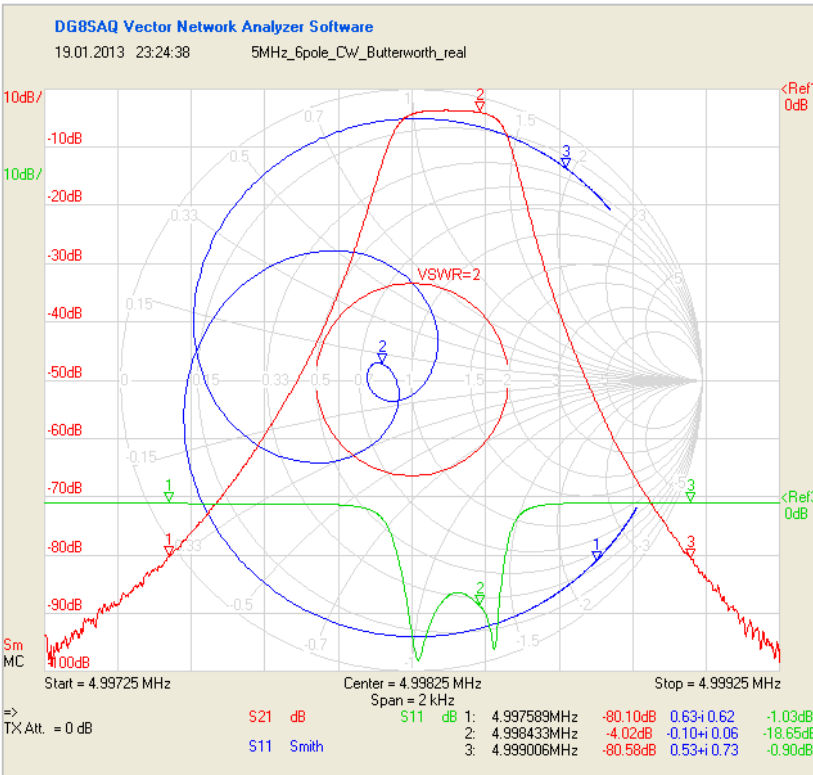
Hier wurde das oben abgebildete, reale Filter mit verlustbehafteten Quarzen ( $Q_u=160k$ ) als Modell für die Simulation genommen. Bei Verwendung der exakt berechneten Koppelwerte (oben in rot) ergibt sich die gestrichelte Ortskurve.

Hier sieht man ein interessantes Charakteristikum eines Butterworth-Filters, nämlich das Fehlen jeglicher Schleifen. Die Kurve erreicht nur an einem Punkt exakt die Systemimpedanz. Das ist auch der Grund, warum die Reflexionsdämpfung (RL) an diesem Punkt im Durchlass über 60db betragen kann. Aber schon kleine Abweichungen lassen diesen hohen Wert schnell auf 30 bis 40db

sinken. Das Fehlen von Schleifen ist ein eindeutiges Zeichen für ein Butterworth-Filter.

Das reale Filter mit den abweichenden Koppelwerten erzeugt daher ein leichtes Tschebyscheff-Verhalten (Schleife). Durch die Verluste bleibt aber die resultierende Durchlasskurve ohne sichtbare Welligkeit, wie die Messung auf der folgenden Seite zeigt. Es zeigt sich auch, dass es fast unmöglich ist, ein lupenreines Butterworth-Filter zu konstruieren.

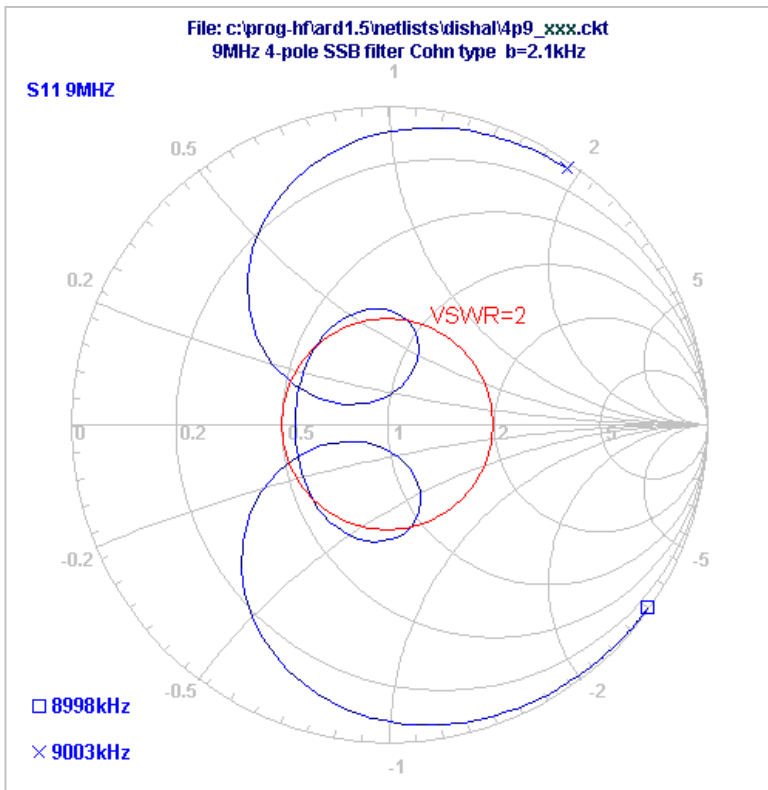
2a) Butterworth-Filter, Messungen



Hier wird die Messung des oben gezeigten CW-Filters gezeigt. Die Übereinstimmung mit der simulierten Ortskurve ist durchaus als sehr gut zu bezeichnen. Die kleine Schleife spiegelt sich auch in der RL-Kurve wider, die eben kein einzelnes Minimum eines Butterworthfilters aufweist. Wie schon oben gesagt, verdecken die Quarzverluste gnädigerweise die eigentlich vorhandene leichte Welligkeit.

Was aber ebenfalls auffällt, ist die Tatsache, dass die Ortskurve in den Sperrbereichen nicht auf die äußere Begrenzung des Smith-Charts zustrebt (wie in den Simulationen), sondern einen sichtbaren Realteil beibehält. Das wird durch die unvermeidbaren Verluste der Anpassungs-Übertrager hervorgerufen. Dies zeigt sich auch im Verlauf der Reflexionsdämpfung, die im Sperrbereich nicht mehr die 0dB-Linie erreicht.

3) Cohn-Filter (constant-k)



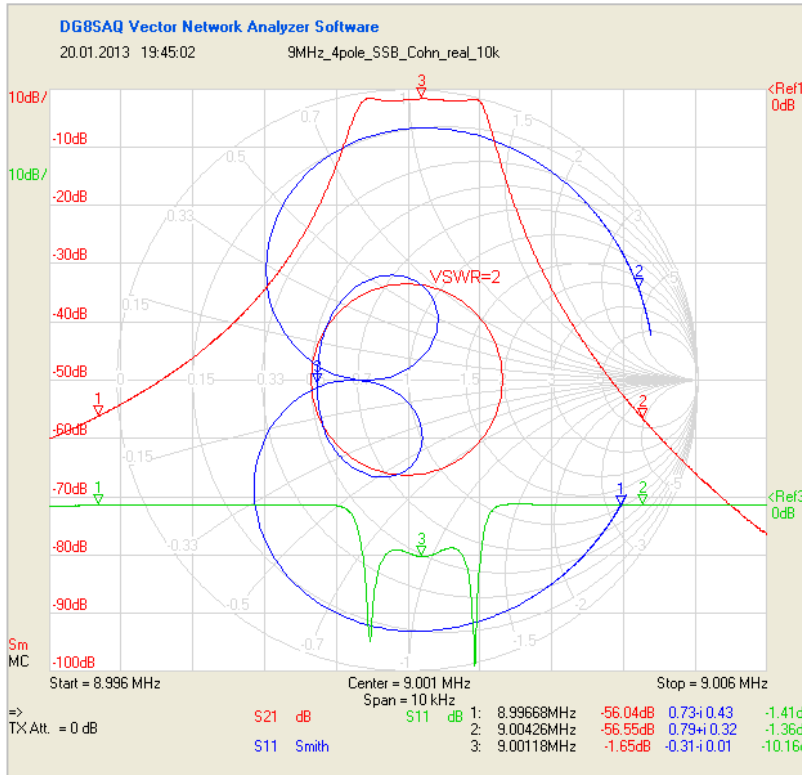
Das sog. Cohn-Filter ist sehr beliebt, weil es so einfach aufzubauen ist. Allerdings weist es durch seine konstante Kopplung eine erhebliche Welligkeit auf, die nicht beeinflussbar ist. Daher findet man bei SSB-Filtern immer nur maximal 4 Quarze im Filter. Die folgenden Bilder zeigen, warum.

Im Bild ist die Simulation eines 4-poligen SSB-Filtern bei 9MHz mit ca. 2,1kHz Bandbreite zu sehen. Die Quarzgüte liegt bei 150000.

Hier zeigt sich schon die starke Fehlanpassung durch die konstante Kopplung, die zu einer relativ starken Welligkeit selbst bei nur 4 Resonatoren führt. Die Impedanzschwankungen mit überwiegend reaktiven Eigenschaften sind im Durchlassbereich bereits ziemlich groß. Breite Filter mit mehr Resonatoren produzieren extrem wellige Kurven, wie weiter unten noch gezeigt wird.

Interessant ist, dass sich zumindest beim 4-Polfilter die Welligkeit noch leicht verringern lässt, wenn die Abschlussimpedanz auf ungefähr 140% der exakten Impedanz erhöht wird. Das geht allerdings auf Kosten einer um bis zu 1db erhöhten Grunddämpfung. Die beiden hier gezeigten Bilder zeigen ein Filter, bei dem statt der berechneten 327 Ohm ein Abschluss von ca. 450 Ohm verwendet wurde

3a) Cohn-Filter, Messung

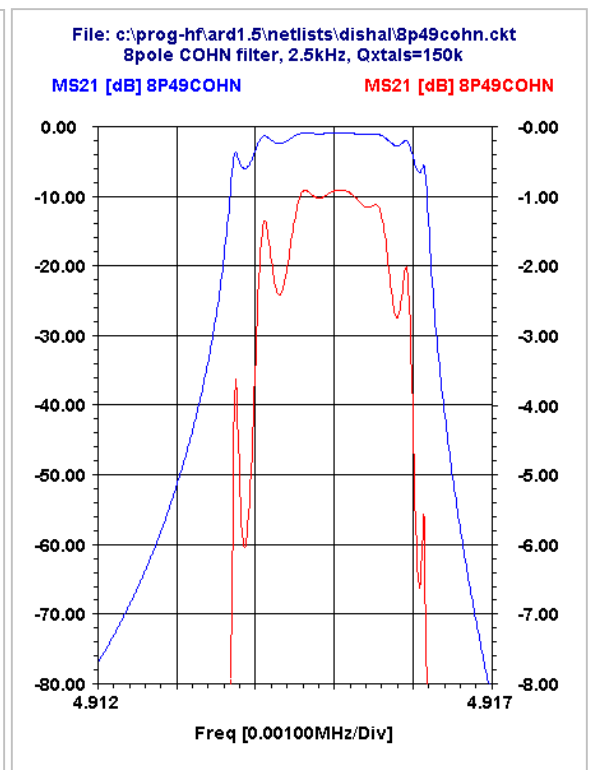
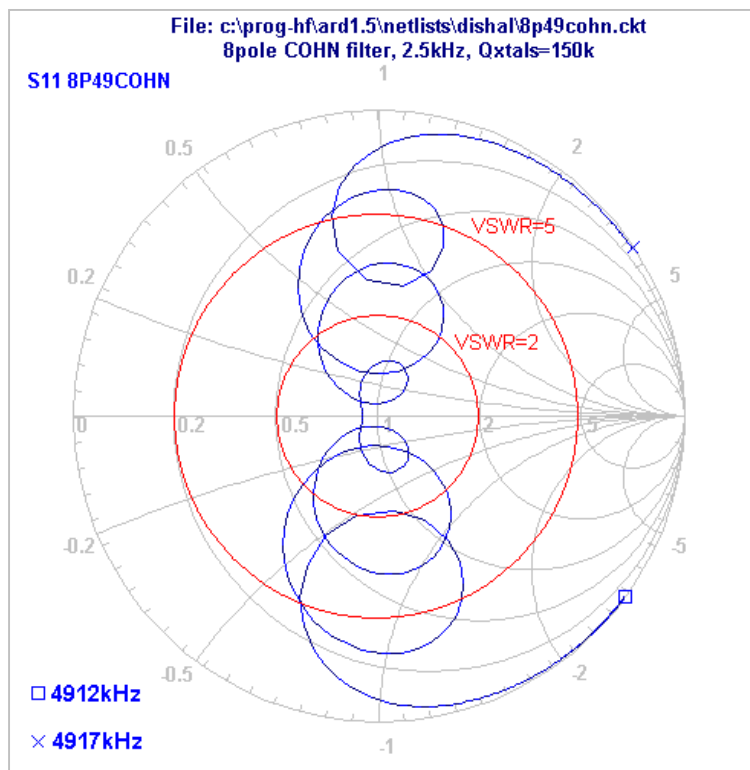


Die Messung des 4-Polfilters zeigt ebenfalls die typische schlechte Anpassung des Cohntyps im Durchlassbereich. Das zeigt sich auch im Verlauf der Reflexionsdämpfung, die sehr niedrig liegt.

Auch hier ist der Einfluss der Dämpfung der Anpasstrafos auf die Ortskurve im Sperrbereich sichtbar.

Bei relativ schmalen (CW-) Filtern und mit Quarzen mittelmäßiger Güte kann man u.U bis zu 6 Quarze verwenden, da hier die erheblich ansteigende Welligkeit durch die Verluste quasi "ausgebügelt" wird.

Folgendes Beispiel (aus gutem Grund nur als Simulation) dokumentiert die Unbrauchbarkeit von breiteren Cohn-Filtern mit z.B. 8 Resonatoren.

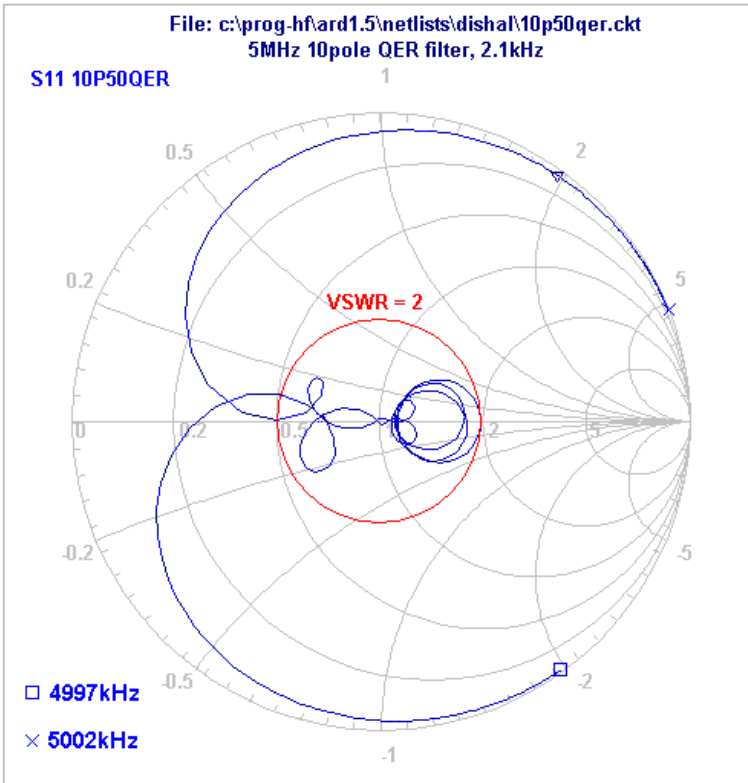


Dieses 8-Polfilter zeigt neben der verzerrten Durchlasskurve die wilde "Kurbelei" der Ortskurve. Nur ein geringer Teil der Durchlasskurve liegt innerhalb des VSWR-Kreises für 1:2. Darüberhinaus weist das Filter im Durchlassbereich ein überwiegend stark reaktives Verhalten auf. Für die Simulation wurde die exakte Abschluss-Impedanz angesetzt, da hier eine Erhöhung keinerlei Verbesserung der Welligkeit erbringt.

Im Bild wurde noch der Kreis für VSWR=5 eingefügt, der einer Reflexionsdämpfung von rund 3,5db und einer resultierenden Welligkeit von 2,6db entspricht.

Das Cohn-Filter wurde von Dave-Gordon Smith, G3UUR unter Beibehaltung der bequemen constant-k Topologie zum sogenannten Quasi-Equi-Ripple (QER) Filter weiter entwickelt. Die leicht geänderten, aber weiterhin konstanten Werte für die jeweiligen Kopplungskoeffizienten und eine Halbierung der Quarzimpedanz in den Endsektionen durch je einen Parallelquarz bewirken eine sehr effektive Reduktion der Welligkeit. Durch diesen sehr geringen Mehraufwand (2 Quarze statt der Serien-Endkapazitäten) kommen die Eigenschaften denen eines Tschebyscheff-Filters recht nahe.

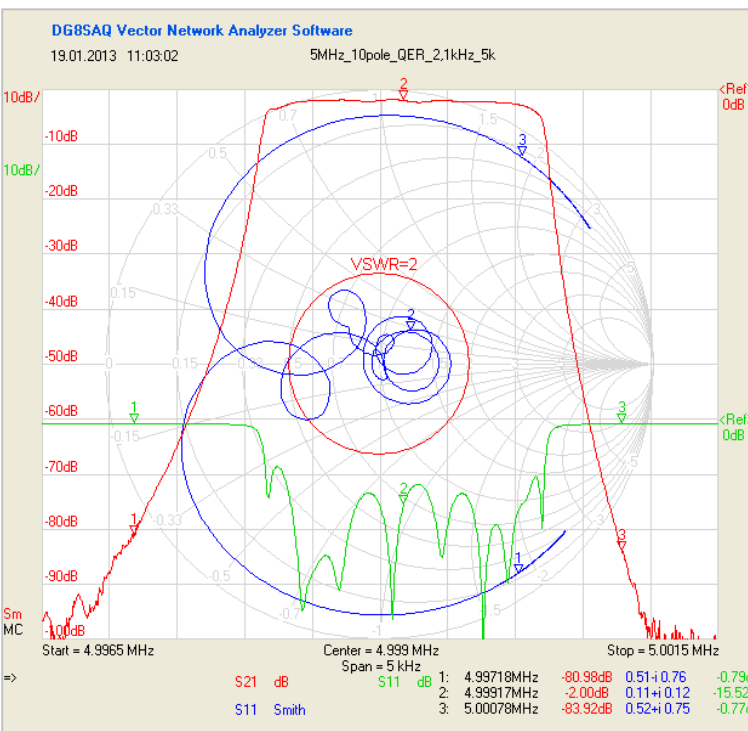
**4) Das QER-Filter nach G3UUR**



Nebenstehend die Simulation eines 10-Pol QER-Filters bei 5MHz mit 2,1kHz Bandbreite.

Trotz der immerhin 10 Quarze mit einer Güte um 150000 bewegen sich jetzt die Schleifen des Durchlassbereichs praktisch vollständig innerhalb des Kreises für VSWR=2. Auch liegen die Durchgänge durch die reelle Achse recht nahe an der Systemimpedanz. Der Verlauf ähnelt jetzt deutlich mehr einem Tschebyscheff- als einem Cohn-Filter.

**4a) QER-Filter, Messung**



Die Messung des realen Filters zeigt eine recht gute Übereinstimmung mit der Simulation. Das wurde auch schon in [1] dokumentiert.

Sie zeigt aber auch, dass die Ortskurve eine außerordentlich empfindliche Anzeige noch so kleiner Unterschiede zwischen Simulation und Messung erlaubt, die im Dämpfungsverlauf der Durchlasskurve selbst kaum zu erkennen sind.

Zum Trost aller NWT-Besitzer sei bemerkt, dass auch der Verlauf der skalaren Reflexionsdämpfung ein sehr empfindlicher Indikator für Abweichungen ist. Es fehlt dann eben nur die Phaseninformation.

## Fazit

Man kann nun für die Ladderfilter folgende generelle Gesetzmäßigkeiten erkennen:

- a) Die Impedanz-Eigenschaften sind im Sperrbereich eines Filters ganz eindeutig:  
Unterhalb des Durchlassbereichs verhält sich das Filter kapazitiv, oberhalb ist es induktiv.
- b) In dem für die Anpassung wichtigen Durchlassbereich zeigt es aber ständig wechselnde kapazitive, induktive oder reelle Eigenschaften.

Deswegen kann man ein Filter im Durchlassbereich prinzipiell mit guter Näherung als reell ansehen. Damit ist eine Anpassung über LC-Glieder oder Übertrager relativ unkritisch, obwohl diese für die Berechnung eine reine Widerstandstransformation voraussetzen. Es ist aber erforderlich, dass das Filter für eine optimale Durchlasskurve möglichst reaktanzarme Abschlüsse erhält. Bei Übertragern sollte man daher auf eine geringe Streuinduktivität achten – normalerweise kein Problem.

Die Annahme, dass sich ein Filter im Durchlassbereich überwiegend entweder induktiv oder kapazitiv verhält, ist definitiv nicht richtig.

Man sollte sich allerdings klarmachen, dass ein einfaches Kaskadieren von Filtern meistens zu leichten Verformungen der resultierenden Gesamtkurve führt. Es ist nämlich äußerst unwahrscheinlich, dass die kleinen, aber zahlreichen Impedanzänderungen im Durchlassbereich beider Filter konjugiert komplex zueinander verlaufen. Hier ist immer eine Entkopplung über ein Dämpfungsglied (min. 6db) oder besser einen Isolationsverstärker notwendig.

dj6ev, Januar 2013

[1] dj6ev "Praxisstudie 5MHz AM+SSB+CW-Filter"  
pdf unter [http://www.bartelsos.de/index.php?dl\\_file=G1TMNGR0CQ](http://www.bartelsos.de/index.php?dl_file=G1TMNGR0CQ) (auf der DK7JB-Webseite)

[2] dj6ev "Ladderfilter bei unterschiedlichen Bandbreiten"  
(9MHz-Cohnfilter, pdf noch nicht veröffentlicht)