

## Bandsperrfilter für "Noise Power Ratio"-Messungen (NPR)

### Ein Hinweis vorab:

In dieser Abhandlung werden Bandsperrfilter mit Quarzen für sehr schmale Bandbreiten im MHz-Bereich und LC-Filter für größere Bandbreiten betrachtet. Bei den Quarzfiltern handelt es sich nicht um Rechenmodelle oder theoretische Analysen für die Konstruktion, sondern um rein empirisch-experimentelle Simulationen. Sie ist auch keine Bauanleitung für solche Filter, sondern zeigt nur realisierbare Beispiele, die zu eigenen Versuchen, bzw. Aufbauten anregen sollen.

Die NPR-Messmethode ("Noise Power Ratio" oder auf deutsch "Rauschklimrmessung") ist eine wirklichkeitsnähere Messung der Intermodulation in Verstärkern oder Empfängern gegenüber der klassischen Zweitontmethode. Sie ist aber nicht Gegenstand dieses Papiers, das sich nur mit den dafür notwendigen Sperrfiltern befasst. Im Internet finden sich zahlreiche ausführliche Beschreibungen dieser Methode, siehe auch [1]...[5]. Die dafür verwendeten Messplätze (Rausch-Leistungsgenerator, LP- und HP-Filter und Sperrfilter) von z.B. W&G oder HP sind kaum noch zu bekommen. Während Rauschgeneratoren und die Bandbegrenzungsfiler noch relativ leicht zu bauen sind, stellen die schmalbandigen Sperrfilter eine Herausforderung für den Amateur dar. Dies ist nur ein Versuch, aufzuzeigen, wie man solche Filter mit Standardbauteilen aufbauen kann.

### Bandsperrfilter mit Quarzen

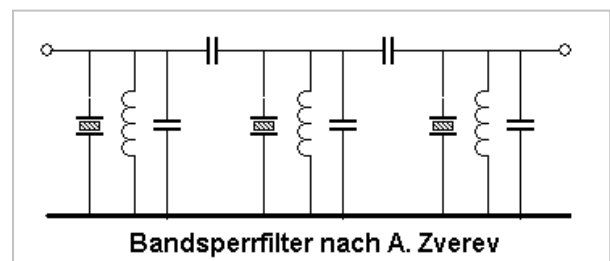
Es gibt über Bandsperrfilter mit Quarzen nur wenig für den Amateur brauchbare Literatur. Die meisten Artikel über solche Filter, nämlich durch Quarze verstellerte Hochpass- und Tiefpass-Kombinationen oder entsprechende Transformationen zu Bandsperrfiltern erfordern üblicherweise Quarze mit maßgeschneiderten Eigenschaften, die für den Amateur normalerweise unerschwinglich sind. Ein solches Beispiel ist in [6] ausgeführt.

Es wurde daher untersucht, wie weit sich brauchbare Filter mit den angestrebten Daten, nämlich einer Sperrbreite von **3kHz bei -100db** im MHz-Bereich mit den uns verfügbaren Quarzen bauen lassen.

Es ist recht einfach, eine Sperrtiefe von bis zu 100db bei 5 bis 10MHz mit 5 Quarzen zu erreichen. Allerdings ist dann die Sperrbreite bei diesem Dämpfungswert extrem schmal (um 100Hz), also für den gedachten Zweck unbrauchbar. Solche Filter werden zur Unterdrückung eines Einzelträgers eingesetzt, z.B. zur Messung von Rauschseitenbändern bei Oszillatoren. Ein Artikel, der sich mit der Konstruktion solcher Filter befasst, wurde von Wes Hayward, W7ZOI in der QEX veröffentlicht [7]. Die Quarze werden hier mit ihrer Serienresonanz als "Kurzschlüsse" eingesetzt, wobei die Kopplung der Stufen über Pi-Glieder als  $\lambda/4$ -Impedanztransformatoren erfolgt. Damit die Sperrwirkung ausreichend groß ist, muss die Filterimpedanz möglichst hoch gewählt werden.

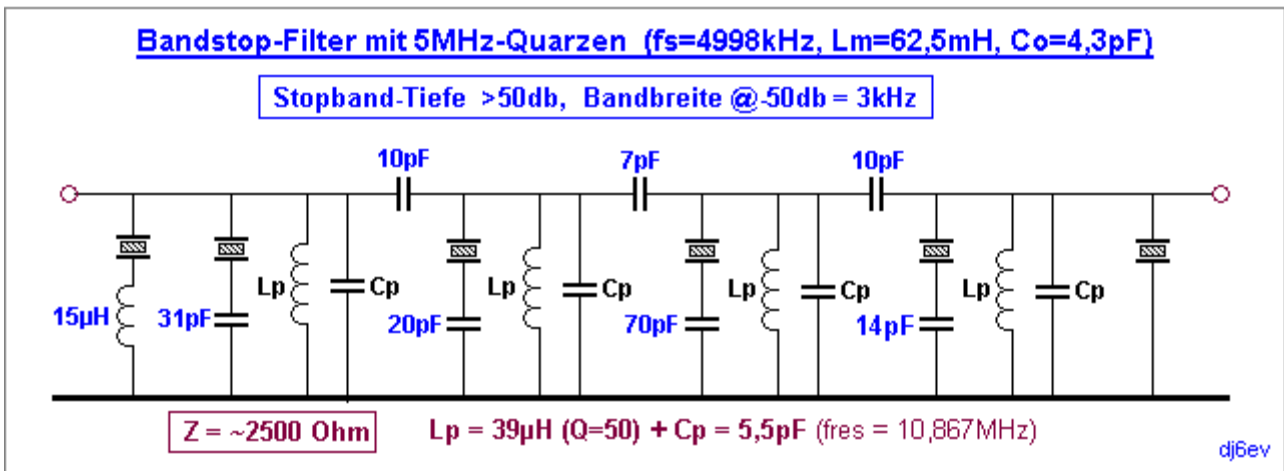
Mit dieser Grundschaltung wurden die ersten Simulationsversuche durchgeführt, um die schmale Sperrbreite durch das Verstimmen der Serienresonanzen der einzelnen Quarze ("Ziehen" durch Serien-L bzw. Serien-C) auf 3kHz Breite zu bringen. Leider gelang es selbst mit insgesamt 6 Quarzen nicht, die Sperrdämpfung dann auf über 40db zu bekommen. Diese Schaltung wurde daher aufgegeben (was nicht heißt, dass es evtl. möglich ist, damit >50db zu erreichen).

Ich probierte daraufhin eine weitere Schaltung aus, die im Filterbuch von A.Zverev beschrieben ist [8]. Hier wird jedem Quarz ein Schwingkreis parallelgeschaltet, wobei die Stufen über die klassische kapazitive Hochpunkt-kopplung verbunden sind.



Als Quarzmodell für die Simulation wurde ein 5MHz-Quarz genommen, da hier solche Quarze für den Bau von Ladderfiltern schon durchgemessen und damit die Parameter bekannt waren. Für die Simulation wurde das obige Modell auf vier Sektionen mit LC-Kreisen erweitert und zusätzlich an den Enden noch mit jeweils einem Quarz versehen. Dies erfolgte schrittweise empirisch unter Kontrolle der Simulationsergebnisse.

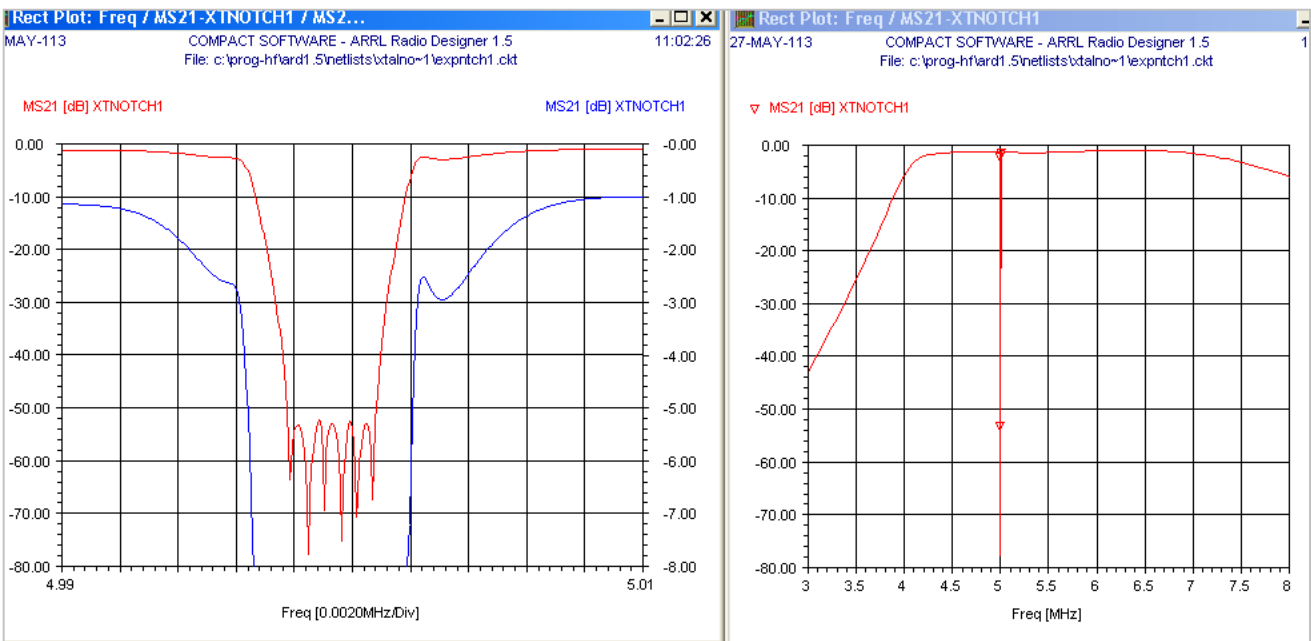
Ein Quarz erhielt ein Serien-L, vier andere jeweils ein Serien-C, um sie in der Frequenz gegeneinander zu versetzen. Dieser Abgleich auf eine Sperrbreite von 3kHz erwies sich als recht diffizil, da sich die Werte im Filter gegenseitig stark beeinflussen. Es war aber möglich, eine relativ gleichmäßige Sperrdämpfung von >50db mit dieser Konfiguration zu erzielen. Die endgültige Schaltung sieht folgendermaßen aus:



Man erkennt, dass die gewählte Filterimpedanz mit rund 2500 Ohm recht hoch ist, um die Sperrdämpfung zu erreichen (die Quarze besitzen ja einen endlichen Serienwiderstand von 12 bis 15 Ohm). Dies lässt sich aber mit streuarmlen Transformatoren noch problemlos an 50 Ohm anpassen.

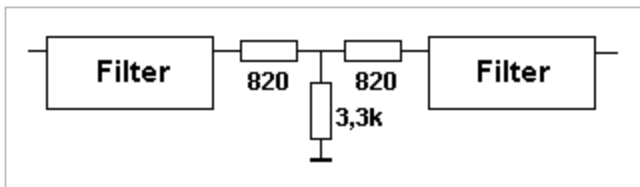
Die Schaltung besitzt einen prinzipiellen Nachteil, der durch die Parallelschwingkreise bedingt ist. Die Durchlassbreite des Sperrfilters wird dadurch deutlich beschnitten. Deswegen wurde das LC-Verhältnis mit  $L=39\mu\text{H}$  und  $C_p=5,5\text{pF}$  sehr hoch gewählt, um eine möglichst kleine Betriebsgüte zu erreichen (parallel dazu liegt auch noch die Halterungskapazität  $C_o$  der Quarze). Die Durchlassbreite konnte dadurch zumindest auf 3MHz (allerdings unsymmetrisch zur Sperrfrequenz) gebracht werden.

Hier die im Simulator erzielten Kurven :

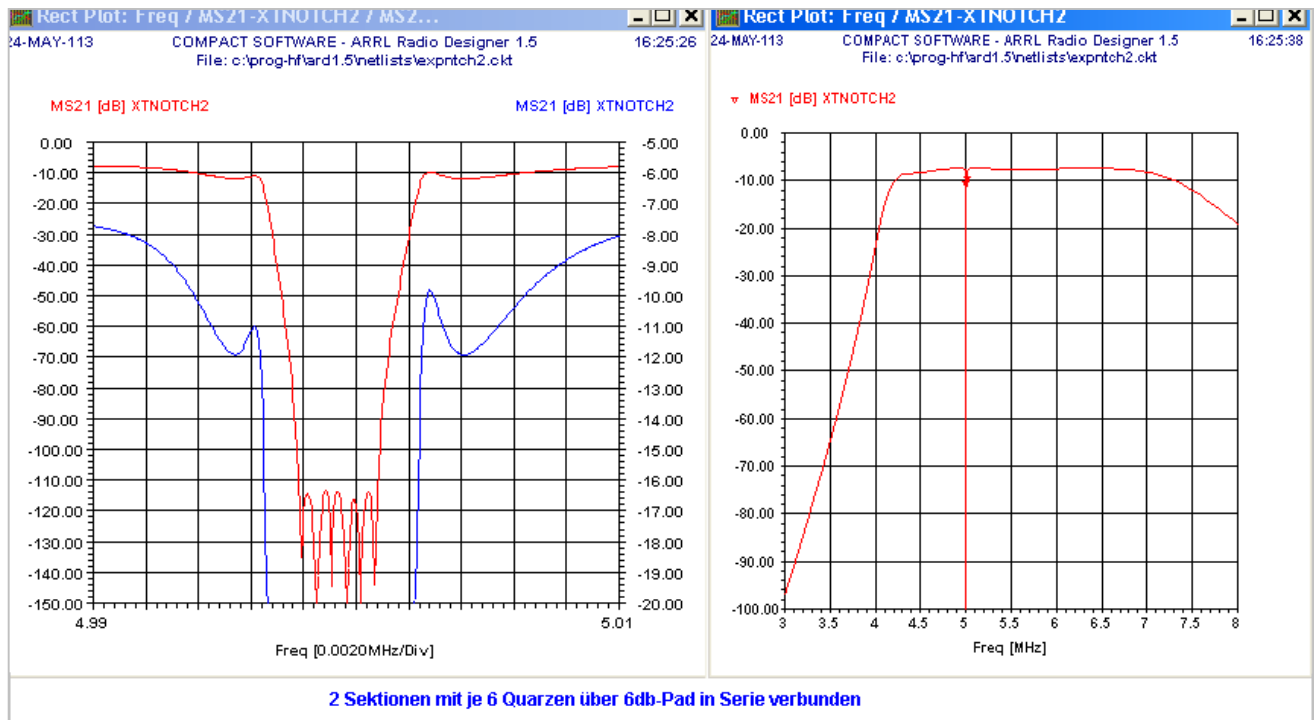


Nun erfüllt die bisher untersuchte Schaltung bei weitem nicht die Forderung nach einer Sperrtiefe von 100db. Man kann nun die Zahl der Filtersektionen verdoppeln, was aber nach den vorliegenden Erfahrungen zu einer enormen Verkomplizierung des Abgleichs führen dürfte. Daher habe ich einfach zwei identische Sektionen über ein 6db-Dämpfungsglied zur Entkopplung zusammengeschaltet:

## Bandsperr-Filter für NPR-Messungen



Durch diesen Trick kann man die gewünschte Sperrtiefe erreichen. Allerdings erhöht sich die Grunddämpfung durch den Abschwächer auf ca. 8db.



Ein weiterer Versuch zeigte, dass auch schon ein 3db-Abschwächer zur ausreichenden Entkopplung genügt. Das reduziert die gesamte Durchlassdämpfung auf 5db. Die limitierte Bandbreite von ca. 3MHz sollte für Messungen an Geräten mit Vorselektion kein Hindernis darstellen. Für Breitbandmessungen kann auf LC-Sperrfilter zurückgegriffen werden, die auf den folgenden Seiten anhand eines 6MHz-Filter beschrieben sind.

Diese Versuche dienen nur zur Orientierung für eigene Konstruktionen. Die resultierenden Werte für die Filterkomponenten hängen natürlich von der gewählten Quarzfrequenz und ganz wesentlich von den Quarzparametern  $L_m/C_m$ ,  $C_o$  ab.

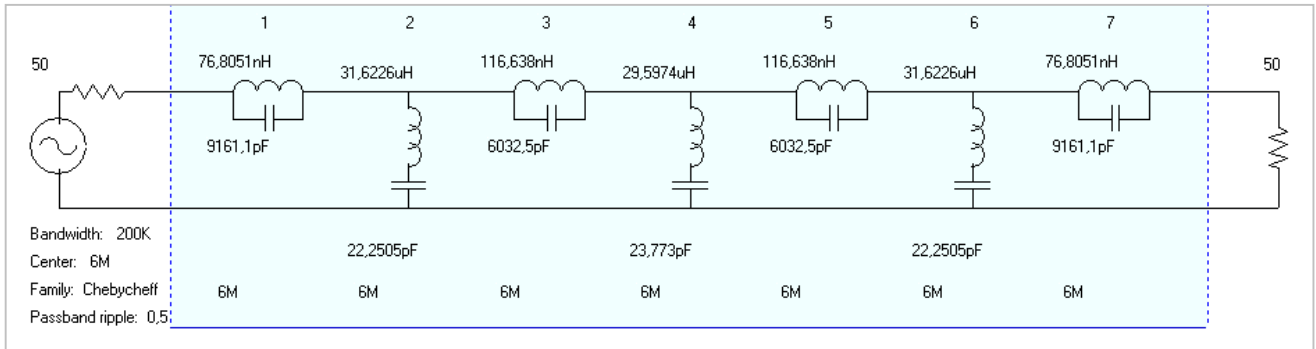
Um die Filterimpedanz in einem praktikablen Bereich zu halten, sollten die Quarze eine möglichst niedrige Induktivität  $L_m$  aufweisen. Daher sind Quarze der normalen Bauform (HC18 / 49) den sogenannten "Low-Profile" Quarzen (HC49-US) vorzuziehen. Die Induktivität der LP-Quarze liegt nämlich ungefähr um den Faktor 3 höher als bei den Quarzen der größeren Bauform.

Bei höheren Quarzfrequenzen ist es übrigens auch einfacher, die 3kHz/-100db Sperrbreite zu erzielen. Es ist auch denkbar, mit einer schmalen Bandbreite des Empfängerfilters, also z.B. mit einem CW- statt SSB-Filter die Messungen durchzuführen. Dann könnte man auch mit schmalen Bandsperrfiltern arbeiten.

LC-Notchfilter bei 6 MHz mit 120db Tiefe, B3db ~350kHz

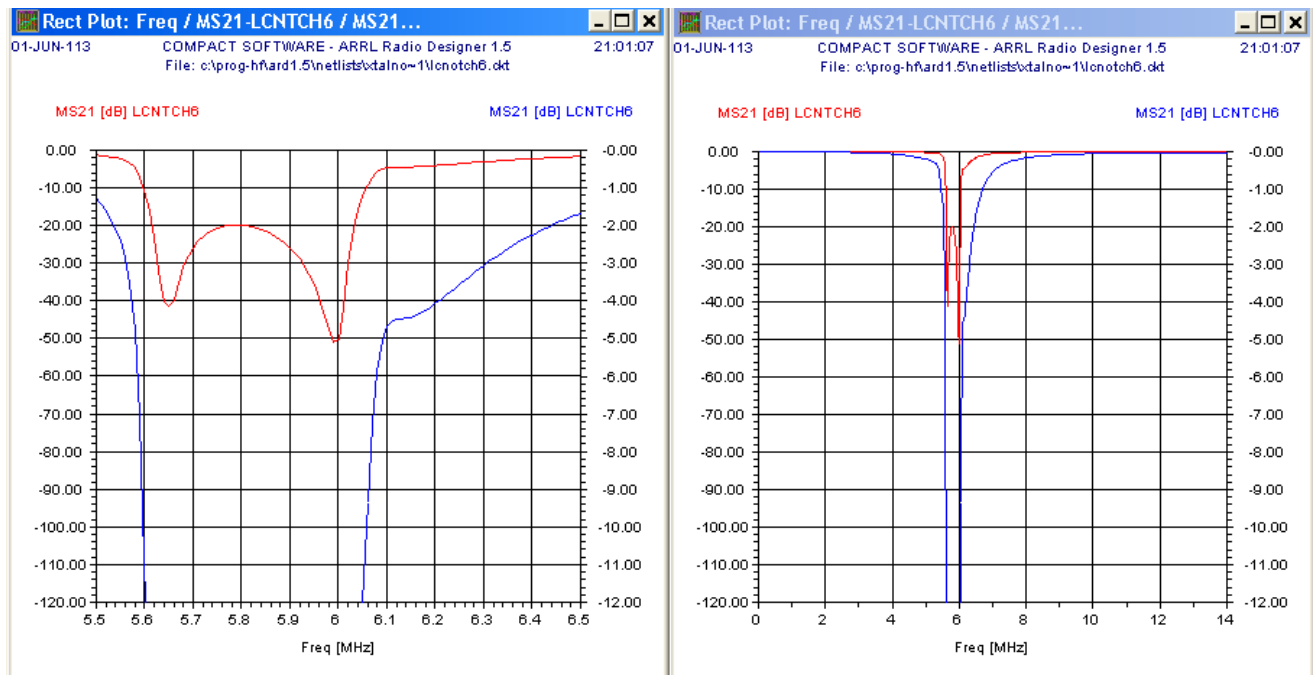
Für NPR-Messungen an Objekten mit breitbandigen Eigenschaften (z.B. Verstärker oder Empfänger ohne Vorselektion) kann man mit breiteren Bandsperr-Filtern arbeiten, die mit reinen LC-Kreisen konstruiert werden können. Solche Filter sind auch – ganz im Gegensatz zu den Quarzfiltern - sehr einfach zu berechnen.

Das folgende Filter wurde mit dem Programm "Elsie" berechnet und erreicht mit 7 Polen eine Sperrtiefe von >120db. Mit der abgebildeten Topologie besitzen die Werte der einzelnen L- und C-Elemente bei 50Ω Systemimpedanz leicht zu realisierende Größen. Die berechnete Schaltung des Filters ist hier gezeigt:



Die oben angegebenen Daten erzeugen in einem Simulator die erwartete Sperrkurve mit einer Tiefe von >120db. Durch die endlichen Güten der Induktivitäten ergibt sich erwartungsgemäß eine Bandbreite von ca. 350kHz/3db statt der gewählten 200kHz im Rechenmodell. Hierbei wurden die Güten der kleinen Induktivitäten der Parallelkreise (als Luftspulen) mit 150 und die der Serienkreise (z.B. auf T106-6) mit 250 angesetzt.

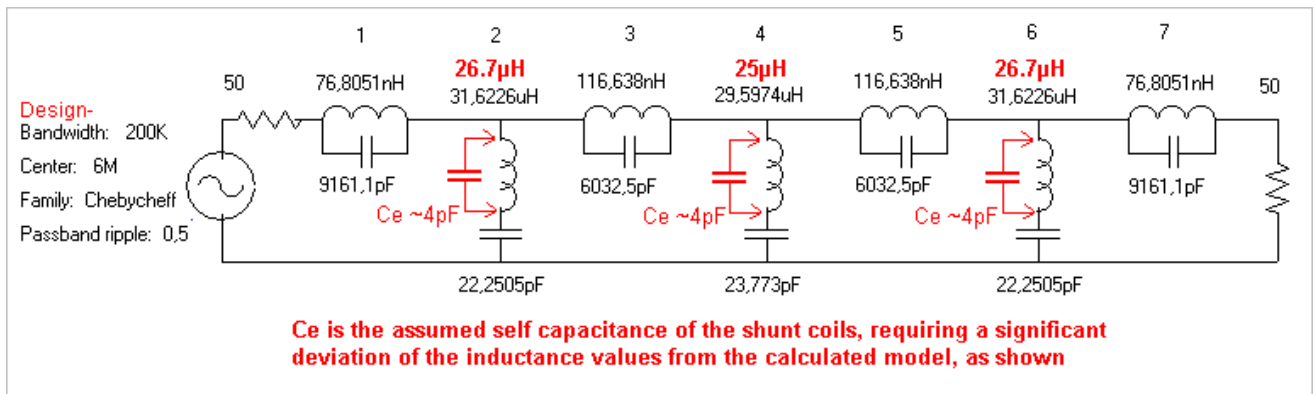
Allerdings besitzen die Induktivitäten der Serienkreise im obigen Modell keinerlei Eigenkapazität, was natürlich in der Realität nicht möglich ist. Das hat auf das schöne Idealmodell gravierende Auswirkungen, wie die folgende Simulation mit einer angenommenen Eigenkapazität Ce von nur 3pF zeigt:



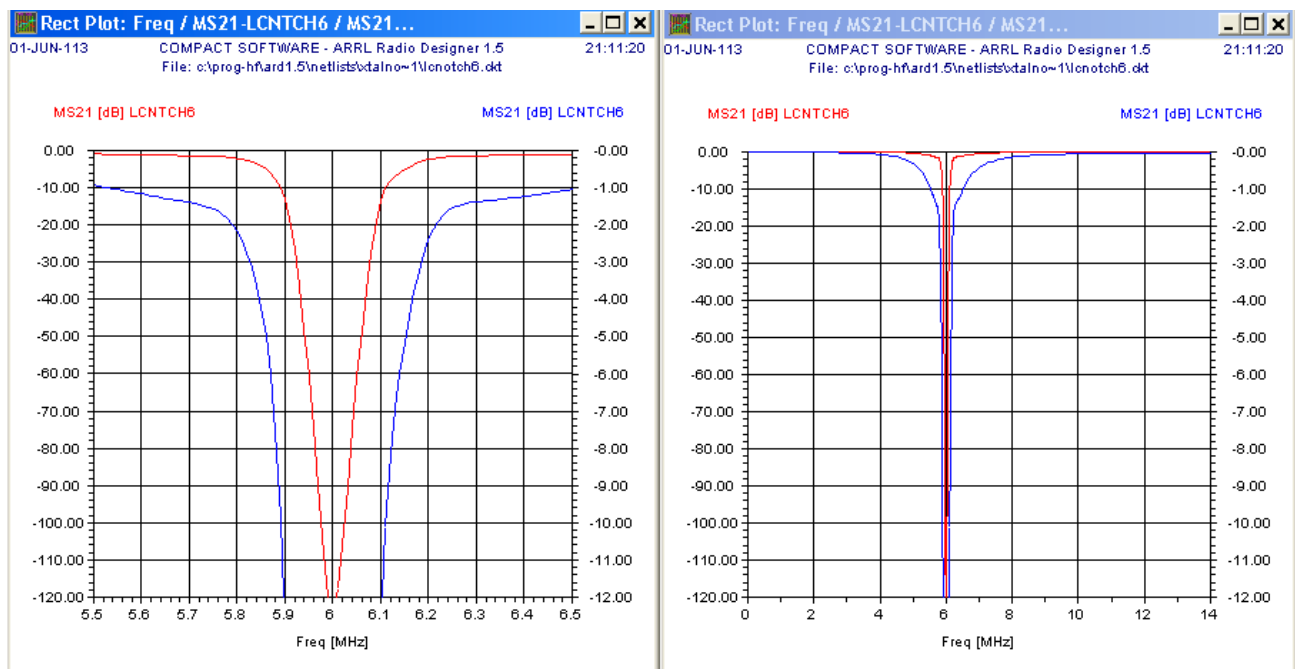
Keine Spur mehr von 120db Sperrtiefe, weil durch Ce die Serienkreise stark "nach unten" verstimmt werden.

Das erfordert eine Modifikation der Serienkreise, die hier durch Veränderung nur der Induktivitäten erfolgte. Hierbei wurde vorsichtshalber eine Eigenkapazität Ce von ca. 4pF angenommen. Die realistische Schaltung ist unten zu sehen:

## Bandsperr-Filter für NPR-Messungen



Diese Dimensionierung mit den erheblich veränderten Werten der Induktivitäten führt dann aber wieder zur gewünschten und gegenüber dem Ideal praktisch identischen Kurve:



Die Sperrtiefe von  $>120\text{dB}$  wurde in der Simulation durch einen Feinabgleich von  $C_e$  erreicht, was einen Wert von  $4,2\text{pF}$  ergab. Das zeigt, dass generell ein Abgleich recht kritisch aber durchaus durchführbar ist. Da aber  $C_e$  von der Ausführung der Spule abhängt, ist es am einfachsten, die Induktivität zusammen mit der nominellen Schwingkreiskapazität möglichst genau auf die Sperrfrequenz (hier 6 MHz) zu dimensionieren und abzugleichen. Den Feinabgleich kann man dann im Filter mit einer Trimmerkapazität parallel zur Serienkapazität durchführen. Das erspart einen zusätzlichen Trimmer parallel zur Spule.

### Einige Hinweise zur praktischen Ausführung des Aufbaus (nur als Richtwerte gedacht):

Zur Erleichterung des Feinabgleichs sollten alle Kreise einzeln vor dem Zusammenbau möglichst exakt auf die Resonanzfrequenz von 6 MHz abgeglichen werden.

Die Induktivitäten von  $76,8\text{nH}$  und  $116,6\text{nH}$  werden am besten als Luftspulen ausgeführt:

$76,8\text{nH}$ : 3wdg 1,5mm CuL auf 8mm Dorn, Länge ca. 6mm

$116,6\text{nH}$ : 4wdg 1,5mm CuL auf 8mm Dorn, Länge ca. 7,7mm

Durch die Drahtstärke und das fast optimale Verhältnis von Durchmesser zu Länge dürfte eine Güte von mindestens 150 erreichbar sein.

Die recht großen Induktivitäten von ca.  $25\mu\text{H}$  und  $26,7\mu\text{H}$  werden z.B. auf Ringkerne T106-6 aufgebracht:

$25\mu\text{H}$ : ca. 47wdg      $26,7\mu\text{H}$ : ca. 48wdg     0,5-0,6mm CuL

Zur Erreichung einer Sperrdämpfung von >100db ist der Aufbau beider Filtertypen in voll abgeschirmter Kammerbauweise empfehlenswert. Bei einem LC-Filter sollten die Abschirmwände einen genügenden Abstand zu den Spulen, speziell den Luftspulen haben.

### Referenzen:

#### **NPR-Messung**

- [1] "Noise Power testing (NPR) of HF Receivers"  
Adam Farson, VA7OJ / AB4OJ  
[http://www.ab4oj.com/test/docs/npr\\_test.pdf](http://www.ab4oj.com/test/docs/npr_test.pdf)
- [2] "Noise Power Ratio Testing"  
Adam Farson, VA7OJ / AB4OJ  
<http://www.nsarcc.ca/hf/npr.pdf>
- [3] "Measurement of all intermodulation products on HF receivers, with 24000 telegraph channels"  
Gianfranco Verbana, I2VGO  
[http://www.woodboxradio.com/download/Final\\_report\\_VGO\\_Renon\\_2009.pdf](http://www.woodboxradio.com/download/Final_report_VGO_Renon_2009.pdf)
- [4] "An Integrated Test Set for Microwave Radio Link Baseband Analysis" (HP 3724A/25A/26A)  
<http://www.hparchive.com/Journals/HPJ-1982-04.pdf>
- [5] "Improved Methods for Measuring Distortion in Broadband Devices"  
Agilent Application Note  
<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-9880EN.pdf>

#### **Bandsperr-Filter**

- [6] "Multi-Section Crystal Bandstop Filter Design"  
[http://www.highfrequencyelectronics.com/Archives/Mar09/HFE0309\\_Mell-Lurie.pdf](http://www.highfrequencyelectronics.com/Archives/Mar09/HFE0309_Mell-Lurie.pdf)
- [7] "Oscillator Noise Evaluation with a Crystal Notch Filter"  
Wes Hayward W7ZOI  
QEX, July/August 2008.
- [8] "Handbook of Filter Synthesis", S. 490 & Fig. 8.64  
Anatol I. Zverev  
John Wiley & Sons Inc., 1967