Fragen und Antworten zum Bau von Ladderfiltern

Im Lauf der letzten Monate hatte sich bezüglich der Anwendung des Dishalprogramms ein reger email-Verkehr entwickelt, bei dem einige Fragen trotz des Quarzfilter-Papiers immer wieder auftauchten. Viele Zusammenhänge sind zwar dort zu finden, aber trotz der bereits stark komprimierten Darstellung sind eben rund 40 Seiten schwer zu verdauen. Das hier ist eine konzentrierte Zusammenfassung und Vertiefung der meistgenannten Themen. Wo es sinnvoll ist, wird auf die entsprechende Seite im QF-Papier verwiesen.

Frage 1:

Warum weicht die Bandbreite meines Filters deutlich von der im Programm berechneten ab (ist immer kleiner)?

Antwort:

Hierfür gibt es eine große Zahl von Gründen. Daher nimmt die Antwort den größten Teil dieser Aufstellung ein.

1) Das Dishal-Programm rechnet immer mit **verlustlosen** Quarzen, wie unter Punkt 3 auf der ersten Seite der Hilfedatei vermerkt. Nur so lassen sich die Filter mit vertretbarem Aufwand in geschlossener Form berechnen. Übrigens werden auch bei den üblichen Filterkatalogen verlustlose Resonatoren angenommen.

2) Der Einfluss der Quarzgüte auf Durchlassdämpfung und die Form der Durchlasskurve wird oft unterschätzt. Auch bei den Quarzfiltern gilt der enge Zusammenhang zwischen der Betriebsgüte **QB** des Filters (Mittenfrequenz geteilt durch die 3db-Bandbreite) und der Leerlaufgüte **Qu** der Quarze, genau wie bei den LC-Filtern.

Bei SSB-Filtern mit nur 4 Quarzen sind die Einflüsse der Quarzgüte noch nicht so stark sichtbar. Bei CW-Bandbreiten kann es aber auch hier schon ganz anders aussehen, wie wir noch sehen werden.

Für Filter mit höherer Selektivität sind aber 8 oder mehr Quarze zur Erzielung einer ausreichenden Flankensteilheit notwendig. Um die Zusammenhänge zu veranschaulichen, wurde folgend jeweils ein SSB-Filter mit 8 Quarzen für die Mittenfrequenzen **9MHz** und **4.915MHz** bei verschiedenen Quarzgüten simuliert und die resultierenden Kurven in **Bild1** und **Bild2** dargestellt. Die 3db-Filterbandbreite wurde mit **2,7kHz** recht hoch gewählt, die Welligkeit mit **0,1db** angesetzt.

Zusätzlich zu den Bildern sind hier noch die Simulationsergebnisse als Tabellen gezeigt. Die Bandbreiten beziehen sich immer auf das jeweilige Maximum der verlustbehafteten Filterkurve, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Die Abweichungen, bzw. Verringerung der Bandbreite (Δf) im Vergleich zum verlustlosen Filter sind rot dargestellt:

8-Polfilter bei 9MHz mit 2,7kHz Bandbreite und 0,1db Welligkeit

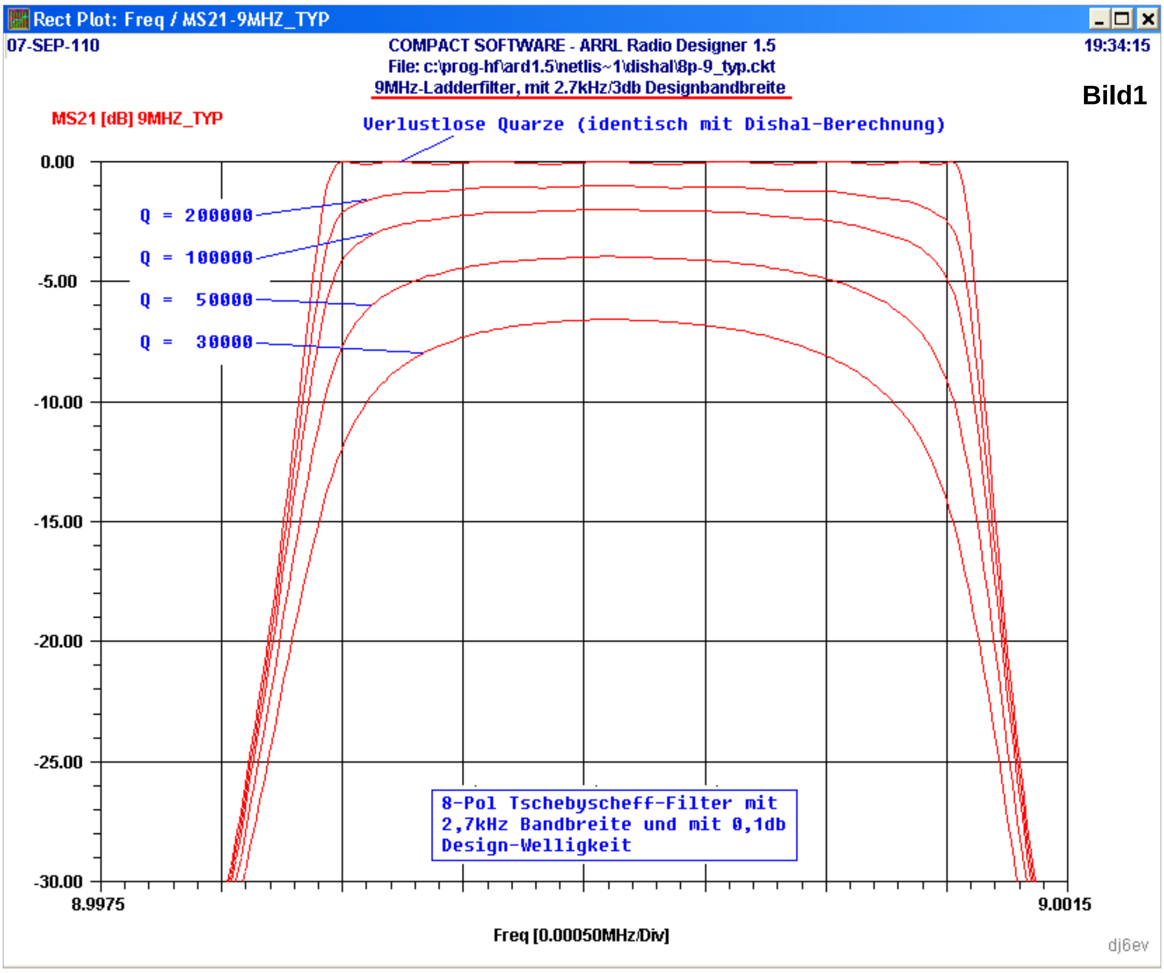
Quarzgüte(Qu)	Dämpfung(db)	b-3db(Hz)	Δf(Hz)	b-6db(Hz)	Δf(Hz)	QB(fm/b3)	Qu/QB
unendlich	---	2700	---	2760	---	3333	---
200 000	0,98	2645	-55	2735	-25	3333	60
100 000	1,95	2550	-150	2700	-60	3333	30
50 000	3,90	2355	-345	2610	-150	3333	15
30 000	6.50	2110	-590	2480	-280	3333	9

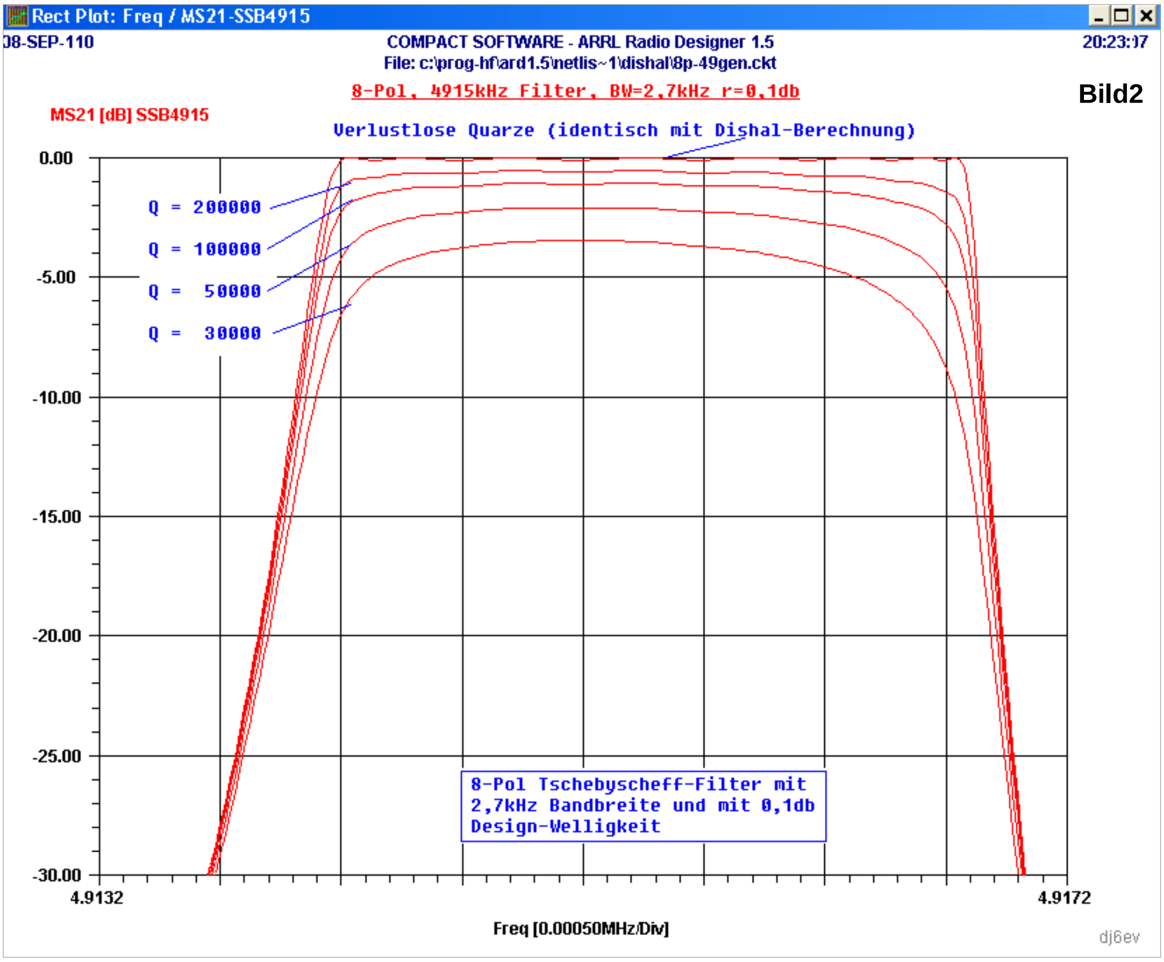
8-Polfilter bei 4,915MHz mit 2,7kHz Bandbreite und 0,1db Welligkeit

Quarzgüte(Qu)	Dämpfung(db)	b-3db(Hz)	Δf(Hz)	b-6db(Hz)	Δf(Hz)	QB(fm/b3)	Qu/QB
unendlich	---	2700	---	2770	---	1820	---
200 000	0,53	2670	-30	2755	-15	1820	110
100 000	1,00	2640	-60	2740	-30	1820	55
50 000	2,10	2520	-180	2690	-80	1820	27,5
30 000	3,50	2360	-340	2630	-140	1820	16,5

Aus den Tabellen und den zugehörigen Bildern auf der folgenden Seite wird ersichtlich, dass bei höheren Filterfrequenzen die relative Bandbreite kleiner, d.h. die Betriebsgüte QB höher wird. Damit steigen die Anforderungen bezüglich der ausreichenden Quarzgüte Qu entsprechend. Man kann sehen, dass erst bei einem Verhältnis von **Qu/QB = >100** die Bandbreite des realen Filters eine vernachlässigbare Verringerung gegenüber dem verlustlosen Filter aufweist. Auch die Unterschiede in der Filterdämpfung und effektiver Bandbreite sind erheblich, d.h., dass sich die endliche Quarzgüte bei kleineren Filterfrequenzen merklich weniger auf beides auswirkt. Man kann auch gut die enge Korrelation zwischen Qu/QB und der Durchgangsdämpfung, sowie der Verringerung der Bandbreite erkennen.

Eine einfache **Faustregel** ist, dass man bei Qu/QB = 25-30 die gewünschte 6db-Bandbreite als (3db-) Designbandbreite ansetzen kann (siehe Dishal-Hilfe, S.12). Da sich die ohnehin meistens verwendete 6db-Bandbreite wesentlich weniger gegenüber dem verlustlosen Filter verringert, ist sie übrigens in der Praxis für Vergleiche besser geeignet.

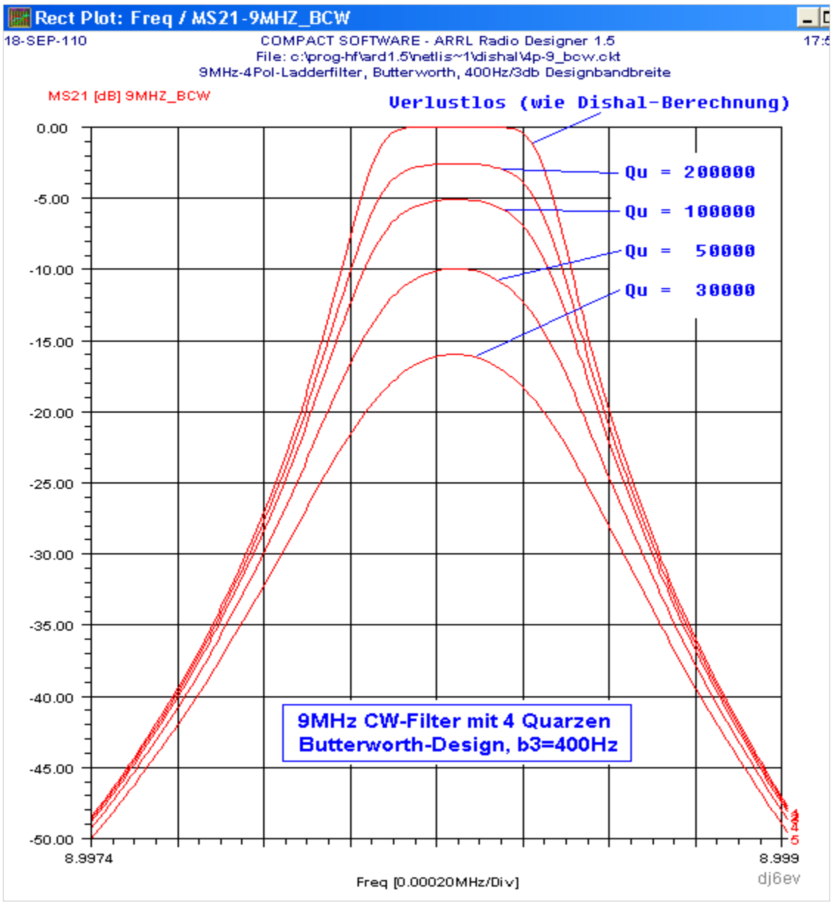

Rect Plot: Freq / MS21-9MHZ_TYP
07-SEP-110
COMPACT SOFTWARE - ARRL Radio Designer 1.5
File: c:\prog-hf\ard1.5\netlis~1\dishal\8p-9_typ.ckt
9MHz-Ladderfilter, mit 2.7kHz/3db Designbandbreite
19:34:15
Bild1
MS21 [dB] 9MHZ_TYP
Verlustlose Quarze (identisch mit Dishal-Berechnung)
Q = 200000
Q = 100000
Q = 50000
Q = 30000
8-Pol Tschebyscheff-Filter mit
2,7kHz Bandbreite und mit 0,1db
Design-Welligkeit
0.00
-5.00
-10.00
-15.00
-20.00
-25.00
-30.00
8.9975
9.0015
Freq [0.00050MHz/Div]
dj6ev


Rect Plot: Freq / MS21-SSB4915
08-SEP-110
COMPACT SOFTWARE - ARRL Radio Designer 1.5
File: c:\prog-hf\ard1.5\netlis~1\dishal\8p-49gen.ckt
8-Pol, 4915kHz Filter, BW=2,7kHz r=0,1db
20:23:07
Bild2
MS21 [dB] SSB4915
Verlustlose Quarze (identisch mit Dishal-Berechnung)
Q = 200000
Q = 100000
Q = 50000
Q = 30000
8-Pol Tschebyscheff-Filter mit
2,7kHz Bandbreite und mit 0,1db
Design-Welligkeit
0.00
-5.00
-10.00
-15.00
-20.00
-25.00
-30.00
4.9132
4.9172
Freq [0.00050MHz/Div]
dj6ev

Leider kollidiert die Forderung nach höheren Quarzgüten bei höheren Filterfrequenzen mit der Tatsache, dass die Quarzgüten im allgemeinen mit steigender Frequenz abnehmen. Natürlich sind Quarze bei z.B. 9MHz auch noch mit Güten von 200000 erhältlich, solche Güten sind aber eher die Ausnahme. Wesentlch besser sieht es mit Quarzen um 5MHz (wie z.B. die beliebten 4.915MHz-Quarze) aus. Hier sind Güten von >200000 recht häufig. Der Preis der niedrigeren Frequenz ist allerdings eine etwas stärkere Asymmetrie bei gleicher Bandbreite (QF-Papier, S.44).

Für die Konstruktion von hochwertigen Filtern spielt also die Quarzgüte eine wichtige Rolle, wenn es um die Bandbreite, die Form der Durchlasskurve (Verrundung der Bandecken) und natürlich auch um die Durchlassdämpfung.geht. Hier lohnt sich der Aufwand, die Quarze auch nach höchster Güte auszusuchen – **zumal die Erfahrung zeigt, dass Quarze mit etwa gleicher Güte meist auch in der Frequenz relativ eng zusammen liegen.**

Dass bei Filtern mit CW-Bandbreiten auch schon bei nur 4 Quarzen ähnliche Auswirkungen der Quarzgüten nicht zu vernachlässigen sind, zeigt das folgende Bild für ein 4-poliges CW-Filter bei 9MHz mit einer Design-Bandbreite von 400Hz, d.h. mit einer Betriebsgüte QB=22500 (auf eine Tabelle wurde verzichtet).



Nebenstehendes Bild zeigt, wie stark sich die Quarzgüte schon bei nur 4 Quarzen, aber sehr hoher Betriebsgüte, besonders im Hinblick auf die Dämpfung auswirkt.

Es wurde absichtlich ein Butterworth-Design trotz der etwas schlechteren Flankensteilheit genommen, da hiermit noch annehmbare Dämpfungen erzielt werden können. Trotzdem beträgt die Dämpfung selbst bei einer Quarzgüte von Qu=100000 schon gut 5db.

Bei einem Tschebyscheff-Filter mit einer Welligkeit von nur 0,01db beträgt die Dämpfung bereits 6db. (Qu=100000). Bei Qu=50000 sind es 11,5db.

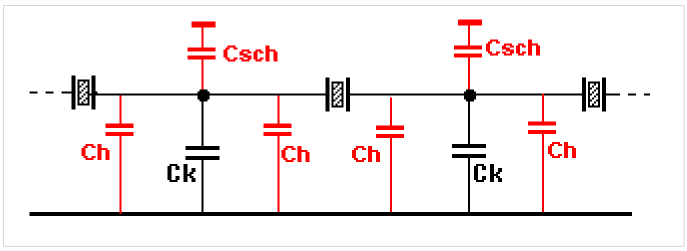
Noch etwas schlechter schneidet ein sogenanntes Cohn-Filter trotz optimierter Anpassung ab. Es weist bei Qu=100000 bereits eine Dämpfung von 6,5db auf. Bei Qu=50000 sind es dann schon 12,5db. Entgegen der landläufigen Meinung weisen Quarzfilter in Cohn-Ausführung keine geringere Dämpfung gegenüber Tschebyscheff oder Butterworth auf, ganz im Gegenteil (QF-Papier, S. 52).

Auffällig ist auch die starke Verrundung, die hier schon bei relativ hoher Quarzgüte zu einer merklichen Verminderung der Bandbreite führt.

Diese Zusammenhänge ergeben sich übrigens völlig unabhängig vom Quarztyp, egal ob HC6U, HC18U, HC49U oder die Low-Profile-Quarze HC49US. Nur die Güte der Quarze ist entscheidend.

3) Eine weitere Rolle spielen die Streukapazitäten, die sich hauptsächlich aus der Kapazität **Ch** des Quarzgehäuses (nicht zu verwechseln mit der Parallelkapazität **Cp** des Quarzes) und der Schaltkapazität der Koppelelemente zusammensetzen. Sie können durchaus eine Größe von rund 3pF erreichen und addieren sich zu den Koppel-kapazitäten. Werden sie nicht berücksichtigt, können sie die Bandbreite von SSB- und AM-Filtern zusätzlich reduzieren, da hier meist die Koppelkapazitäten unter 100pF, überwiegend sogar unter 50pF liegen. **Eine Faustregel sollte daher sein, die realen Kondensatoren Ck um ca. 2-3pF kleiner als die errechneten Werte auszulegen.** (Siehe im QF-Papier S.41,42 und 46; in der Dishal-Hilfe S.12).

Die Wirkung dieser unerwünschten, aber nun einmal vorhandenen Kapazitäten ist im folgenden Bild gezeigt:



Jeder Koppelkapazität Ck liegen 2 x Ch + Cschalt parallel. Voraussetzung ist, dass die Quarzgehäuse geerdet sind, um undefinierte Zustände zu vermeiden.

Man kann nun rund 2-3pF als Wert pro Knotenpunkt einfach ansetzen. Die Kapazität **Ch** lässt sich aber auch messen, indem man die beiden Beine des Quarzes miteinander verbindet und direkt gegen das Quarzgehäuse misst. In diesem Fall ist das gemessene **Cx = 2x Ch**.

Bisher von mir gemessene Mittelwerte für Ch lagen etwa bei:

HC18 / HC49U	**ca. 0,85 pF – 1,0 pF**	(Quarze von 4.915 bis 9MHz)
HC49US (LowP)	**ca. 0,75 pF**	

Man braucht nicht unbedingt jeden Quarz für Cp und Ch durchzumessen, da diese Kapazitäten bei einer Charge nur wenig voneinander abweichen. Stichproben reichen hier aus.

4) Die wohl kritischste Ursache für größere Abweichungen von der Berechnung ist eine fehlerhafte Messung der Quarzparameter. Wenn z.B. die Quarzinduktivität Lm zu klein ermittelt wird, wird sich die Bandbreite unweigerlich im praktischen Aufbau als zu klein herausstellen. Nun kann man natürlich im Dishal-Programm die Bandbreite bei der Filterberechnung einfach entsprechend größer wählen, aber das würde die genaue Berechnungsmethode, die das Dishalprogramm bietet, ad absurdum führen. Es ist auf jeden Fall besser, nicht mit solchen Workarounds in zeitraubender Manier an den Symptomen herumzukorrigieren, sondern die Ursache, nämlich die Fehlerquellen bei der Messung der Quarzdaten zu finden und abzustellen. Nach Murphy addieren sich offensichtlich alle Fehler bei der Messung immer nur in die gleiche Richtung. Bei der 3db-Methode ist z.B. die genaue Messung der Dämpfung recht kritisch. Amplitudendifferenzen von nur 0,5% (0,05db) ergeben schon sichtbare Unterschiede bei Lm und der Quarzgüte Qu (siehe auch im QF-Papier S.37-41). Auch eine Amplitudendrift von Verstärkern kann dies schon bewirken.

   Man kann die Größe der Abweichung am besten feststellen, indem man die vom Programm errechneten Daten für die Kapazitäten und Abschlussimpedanz zusammen mit den Quarzdaten in einen Simulator eingibt (auch RFSim99 ist dafür gut geeignet – siehe hierzu den Hinweis auf S.45 des QF-Papiers). Man wird dann in diesem Beispiel auch im Simulator, selbst unter Berücksichtigung der Quarzveluste, eine größere Bandbreite als die am Filter gemessene feststellen. Dann verändert man die Quarzdaten Lm/Cm in der Simulation solange (natürlich bei konstanter Quarzresonanz), bis die simulierte und die gemessene Bandbreite übereinstimmen. Man bekommt damit die wichtige Information darüber, um wieviel die gemessenen Quarzdaten "daneben" liegen.

   Eine sehr empfehlenswerte Methode ist auch, mit nur 2 oder max. 3 Quarzen ein Filter (mit ca. 2 bis 4kHz Bandbreite und 0,5db bis 1db Welligkeit) aufzubauen, deren Bandbreite zu messen und die Daten mit der Berechnung zu vergleichen. Bei so wenigen Quarzen ist nämlich die Bandbreitenreduzierung durch die Quarzverluste noch vernachlässigbar. Als zusätzliche Möglichkeit kann man im Zweifelsfall die Quarze zum Vergleich mit einer anderen Methode (z.B. der Oszllatormethode nach G3UUR) messen.

Frage 2:

Warum zeigen breitere (SSB-) Filter im Top eine stärkere Absenkung an der frequenzhöheren Ecke ("Dachschräge") ?

Antwort:

Der Grund für diese Absenkung ist die Asymmetrie eines normalen Ladderfilters, die der durch die Parallelkapazität **Cp** der Quarze erzeugte **Dämpfungspol** auf der hochfrequenten Seite des Filters hervorruft. Bei abnehmender Güte der Quarze verwischt sich durch die Verrundung außerdem zunehmend die Grenze zwischen Durchlass- und Sperrbereich. Dadurch wird die hochfrequente Seite des Filterdachs durch die steilere Flanke des Sperrbereichs stärker "herabgezogen". Je unsymmetrischer ein Filter ist, desto sichtbarer wird dieser Effekt. Man kann das ansatzweise beim Vergleich der Bilder 1 und 2 oben sehen. Diese Dachschräge tritt auch etwas stärker bei größerer Welligkeit der Filter auf (siehe z.B. Bild41 auf S.52 im QF-Papier).

Allerdings ist diese Absenkung mit normalerweise 0,5 bis max. 1,5db nicht allzu ausgeprägt, wenn nicht gerade ein Filter mit extremer Asymmetrie vorliegt. Wenn aber in einem Filter mit normalen Daten diese Dachschräge wesentlich stärker auftritt, ist das immer ein Zeichen von falscher Dimensionierung oder sogar fehlerhaften Bauteilen.

Bei voll kompensierten Ladderfiltern (d.h. Cp = effektiv Null) mit symmetrischer Durchlasskurve ist dieses Verhalten nicht vorhanden.

Frage 3:

Warum liefert das Filterprogramm von AADE bei gleichen Quarz- und Filterdaten höhere Werte für die Kapazitäten und eine kleinere Abschlussimpedanz als das Dishalprogramm?

Antwort:

Das Programmpaket von AADE ist ein mächtiges Werkzeug zur Berechnung von Filtern aller möglichen Topologien. Es ist sicher eines der besten Freeware-Programme dieser Art für LC-Filter.

Leider liefert es bei der Berechnung von Ladderfiltern mit Quarzen falsche Werte für die Filterkomponenten. Das liegt daran, dass die Parallelkapazität Cp der Quarze bei der Berechnung der Koppel- und Impedanzwerte gar nicht berücksichtigt wird, obwohl diese bei der Eingabe der Quarzparameter bzw. bei den angebotenen Quarzmodellen vorhanden ist. Die Folge ist grundsätzlich eine wesentlich kleinere resultierende Bandbreite, wie sie auch in der vom AADE-Programm angezeigten jeweiligen Kurve zu sehen ist. Die gleiche Kurve erhält man, wenn die Quarzparameter und die berechneten Werte z.B. in ein Simulationsprogramm eingegeben werden (QF-Papier, S.32, unten).

Die gezeigten Durchlasskurven, die ja erwartungsgemäß unsymmetrisch sind, haben mit der Berechnung der Komponenten selbst also wenig zu tun. Die vom Programm auch ermöglichte separate Eingabe des bekannten Dishal-Faktors "1/r0v3" (QF-Papier, Bild29, S.32) ist aber prinzipiell irreführend, da dieser Faktor bereits fest durch die eingegebenen Quarz- und Filterparameter definiert ist. Man kann ihn daher gar nicht noch zusätzlich frei wählen. Diese Eingabe bietet zwar eine lehrreiche Anschauung vom Einfluss dieser Größe auf die Symmetrie der Filterkurve, ist aber deswegen zwangsläufig von der Berechnung der Komponenten völlig unabhängig.

Wenn man zum Vergleich die identischen Quarz- und Filterparameter in das Dishal-Programm eingibt und Cp einfach auf Null setzt, erhält man exakt die gleichen Resultate für die Kapazitäten und die Abschlussimpedanz wie bei AADE.

Frage 4:

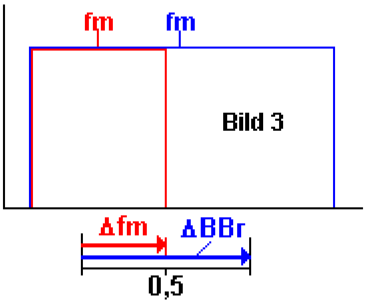
Wie stark wirkt sich eine Änderung der Bandbreite auf die Mittenfrequenz eines Ladderfilters aus?

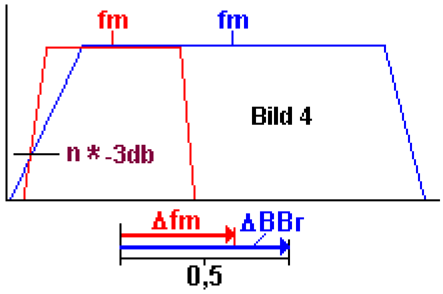
Antwort:

Bei einem idealen Ladderfilter mit senkrechten Flanken würde sich nur die obere Flanke bewegen. Die Änderung der Mittenfrequenz sei mit Δfm, die der Bandbreite mit ΔBBr bezeichnet. Dann gilt in diesem Idealfall der einfache Zusammenhang:

Δfm = ΔBBr / 2.

→ Siehe Bild 3.





In der Realität liegt natürlich ein Filter mit endlichen Flankenschrägen vor, bei dem durch den Dämpfungspol oberhalb der Filterfrequenz die obere Flanke etwas steiler verläuft als die untere (Bild4). Durch eine Verringerung der Bandbreite bleibt nun die untere Flanke nicht etwa unverändert stehen, sondern wird ebenfalls steiler. Zusätzlich "dreht" sie sich um einen Punkt, der frequenzmäßig die Serienresonanz der Quarze darstellt und um den Betrag n * -3db unterhalb des Filter-Tops liegt, wobei "n" ist die Zahl der Quarze im Filter ist. Das heißt, dass sich in Wirklichkeit nicht nur die obere Flanke in der Frequenz nach unten bewegt, sondern ebenfalls die untere Flanke. Das ergibt immer eine Verschiebung der Mittenfrequenz um mehr als ΔBBr /2. Ein guter Anhaltswert für eine Überschlagsrechnung ist:

Δfm = ~0,6 *ΔBBr. (Siehe auch das untere Bild auf Seite 47 im QF-Papier)

Auch dieser Zusammenhang ist unabhängig vom Quarztyp, egal, ob HC6U, HC18U, HC49U oder HC49US (Low-Profile). Entscheidend ist nur die Form der Filterkurve (Asymmetrie und Flankensteilheit).

→ Man kann die Größe der Verschiebung von fm natürlich auch ganz bequem und genau mit dem Dishal-Programm ermitteln, das ja automatisch die Mittenfrequenz für eine gegebene Filterbandbreite anzeigt.