

## Quarz - Ladderfilter Programm "Dishal"

Dieses Programm wurde geschrieben, um eine sehr einfache und bequeme Berechnung aller notwendigen Komponenten für den Bau von Ladderfiltern vom "Lower-Sideband"-Typ (LSB) zu ermöglichen. Es erlaubt die Berechnung von Filtern mit **2 bis 14** Resonatoren.

### Einige Punkte zur Beachtung:

- 1 Das Programm berechnet nur Butterworth- and Tschebycheff Filter (bis 3db Welligkeit).  
Ein Unterprogramm für die exakte Berechnung von sog. "Cohn"-Filtern ist ebenfalls enthalten  
→ Ein neues Programm für die Berechnung der "QER"-Variante des Cohn-Typs wurde hinzugefügt
- 2 Alle Parameter der Filterquarze werden als identisch angenommen (fs, Lm, Cm, Cp).
- 3 Die Quarze werden als verlustlose Resonatoren angesehen.

Allerdings liefert das Programm sehr genaue Resultate für alle relevanten Filterparameter und der Komponentenwerte.

Eine zusätzliche grafische Darstellung der resultierenden Durchlasskurve erlaubt eine schnelle Beurteilung der Filtereigenschaften.

### Eingabefelder

Alle notwendigen Eingaben sind im unten gezeigten Feld konzentriert:

### Quarz-Parameter

Hier kann wahlweise die Quarzinduktivität **Lm** oder die Quarkapazität **Cm** eingegeben werden. Der jeweils andere Wert wird dann über die Serienresonanz ("**Series Freq. Fs**".) errechnet. Die Eingabe der Halterungskapazität des Quarzes **Cp** ist ebenfalls erforderlich.

Es mag auffallen, dass keine Eingabe für die Parallelfrequenz **fp** existiert. Dies ist deswegen nicht vorgesehen, weil die Messung von fp durch Streukapazitäten und der Abhängigkeit von der Abschlussimpedanz recht ungenau ist. Daher wird fp aus den obigen Eingabeparametern errechnet.

### Filter-Parameter

#### - 3db-Bandwidth (BW):

Die 3db-Bandbreite kann bis zur maximal möglichen Bandbreite eingegeben werden. Die maximale BW wird berechnet und nun auch unter dem Eingabefeld angezeigt. Es erfolgt eine Fehlermeldung, wenn dieser Wert überschritten wird. Außerdem kann der Maximalwert (als "Hint") angezeigt werden, wenn man mit dem Mauszeiger in das "B3db"-Feld fährt.

#### - Passband ripple:

Eine Welligkeit von 0db erzeugt eine Butterworth-Kurve, jeder Wert von >0 bis 3db erzeugt eine Tschebyscheff-Kurve.

- Number of crystals: jede Anzahl von **2 bis 14** Quarzen (Pole) ist möglich.

- Frequency Span: kann beliebig zwischen **>0 und 400kHz** für die Grafik gewählt werden.

Ein Klick auf den "**Calculate**"- Button oder das Drücken der **<RETURN>** Taste bewirkt nach jeder Eingabe eine Neuberechnung und Aktualisierung der Resultate und Grafik-Darstellung.

Jede unzulässige oder fehlende Eingabe generiert eine entsprechende Fehlermeldung.

## Anzeige der Resultate

### Xtal parameters

Hier werden die dynamische Induktivität  $L_m$  und Kapazität  $C_m$  des Quarzes neben den zugehörigen Serien- und Parallelresonanzfrequenzen  $f_s$  and  $f_p$  dargestellt. Die Halterungskapazität  $C_p$  kann im Eingabefeld abgelesen werden. Der jeweils berechnete Wert für  $C_m$  oder  $L_m$  wird mit einer Auflösung von mindestens 6 Dezimalstellen gezeigt. Das hat absolut nichts mit der Genauigkeit zu tun, sondern ermöglicht die exakte Darstellung der Serienresonanz, wenn diese Daten in einem Simulationsprogramm verwendet werden

### Filter parameters

Die folgenden Parameter werden im oberen Bereich gezeigt:

<b>Filter type</b> (Butterworth / Tschebycheff),	der Filtertyp
<b>Passband ripple,</b>	die Welligkeit im Durchlassbereich
<b>Impedance,</b>	Abschlussimpedanz (in <b>Rot</b> , wenn $>3000$ Ohm)
<b>Number of xtals,</b>	Zahl der Quarze (Pole)
<b>Center frequency,</b>	Mittenfrequenz des Filters

**Bandwidth,** die Bandbreiten für folgende Dämpfungswerte:  
-6db, -20db, -40db, -60db, -80db, und -100db

### Coupling (Shunt) capacitances

Dies sind die berechneten Werte der Koppelkapazitäten für die gewünschte Bandbreite. Die Indexzahlen ("Ck12", "Ck23", usw.) beschreiben ihre Position zwischen den jeweiligen Quarzen.

Hinweis: Die Zahlen erscheinen in **Rot**, wenn der Wert für das jeweilige Ck **10pF** unterschreitet.

### Tuning (Series) capacitances

Dies sind die Werte der Kapazitäten in Serie mit den jeweiligen Quarzen, um sie auf die gemeinsame Maschenfrequenz ("mesh frequency") des Filters zu ziehen. Ihre Indexzahlen ("Cs1", "Cs3", usw.) bezeichnen ebenfalls ihre Verbindung zum jeweiligen Quarz

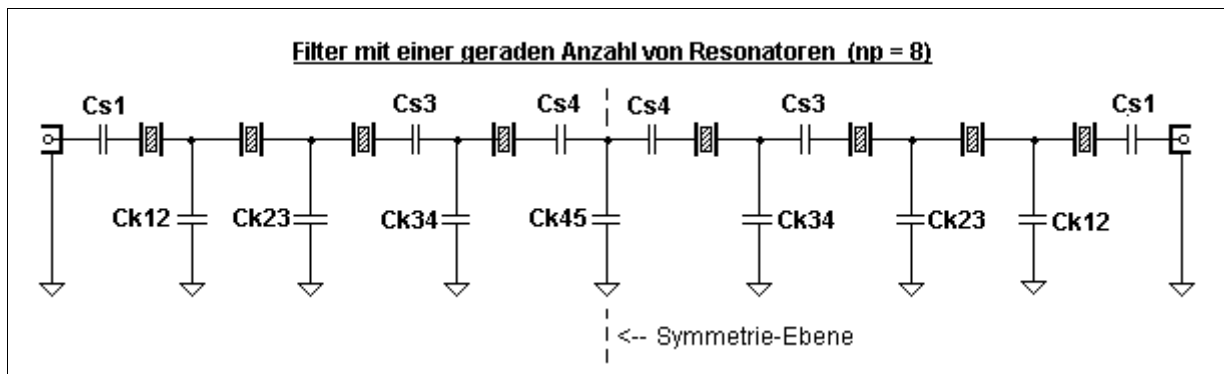
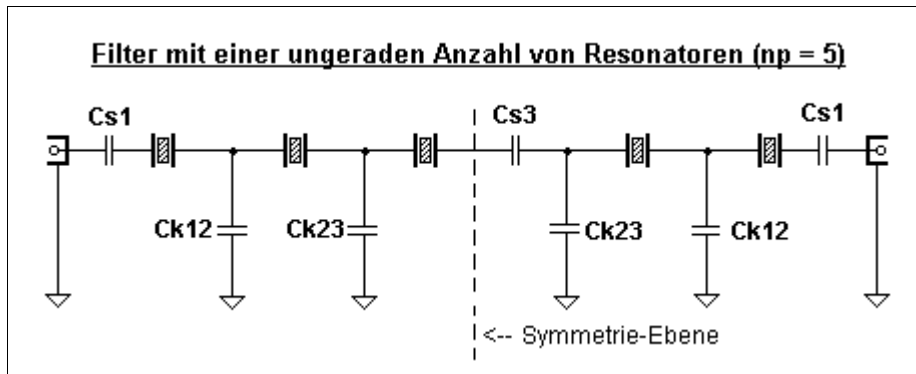
Neben den Kapazitätswerten sind die individuellen (immer positiven) Frequenzoffsets zu  $f_s$  aufgeführt, die durch die jeweilige Serienkapazität hervorgerufen werden. Wenn Quarze mit passenden Offsets verfügbar sind, sind die Serienkapazitäten an der entsprechenden Stelle unnötig. Die "Referenzfrequenz" für diese Offsets ist immer die Maschen-Frequenz für Quarz #2 und den vorletzten Quarz #n-1 im Filter – die einzigen ohne eine Serienkapazität.

→ Für nähere Details, siehe den Teil: "Mesh Frequency" (Anhang)

Es ist nur die Hälfte der notwendigen Koppel- und Serienkondensatoren aufgeführt

Das ist ausreichend, da die Butterworth- und Tschebycheff-Filter symmetrisch aufgebaut sind. Daher ist z.B. die Koppelkapazität  $Ck_{1,2}$  identisch mit  $Ck_{n-1,n}$  und so weiter.

Die folgenden Bilder von Filtern mit ungerader und gerader Anzahl von Quarzen illustrieren diesen Zusammenhang:



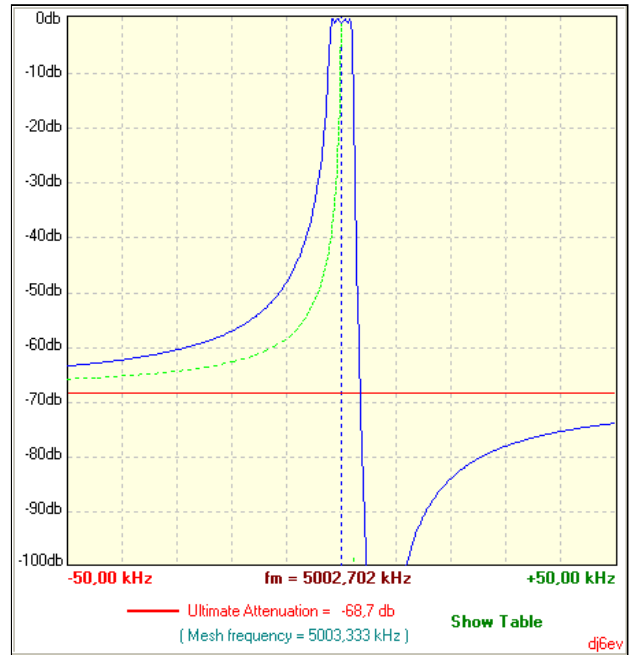
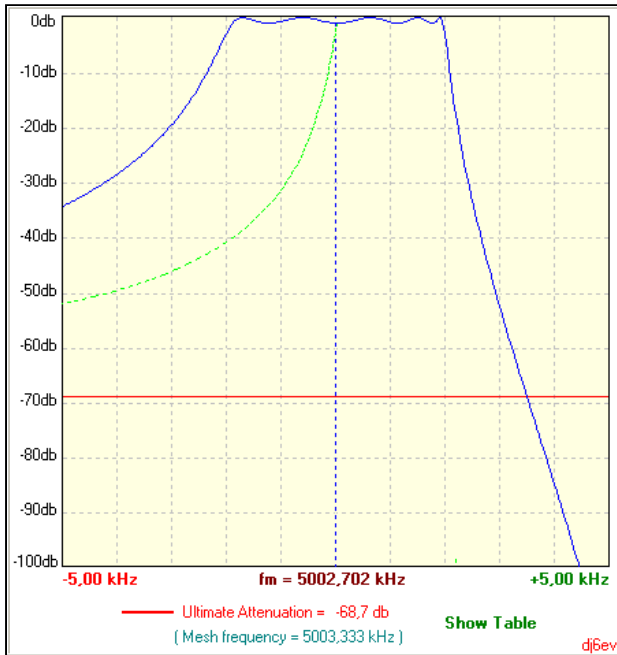
Position der Koppelkondensatoren (Ck) und der Ziehkondensatoren (Cs) in typischen Filterkonfigurationen

Als zusätzliche Information wurde eine Tafel mit den kompletten Schaltbildern aller Filter für die Polzahlen von 2 bis 14 an das Ende des Anhangs angefügt.

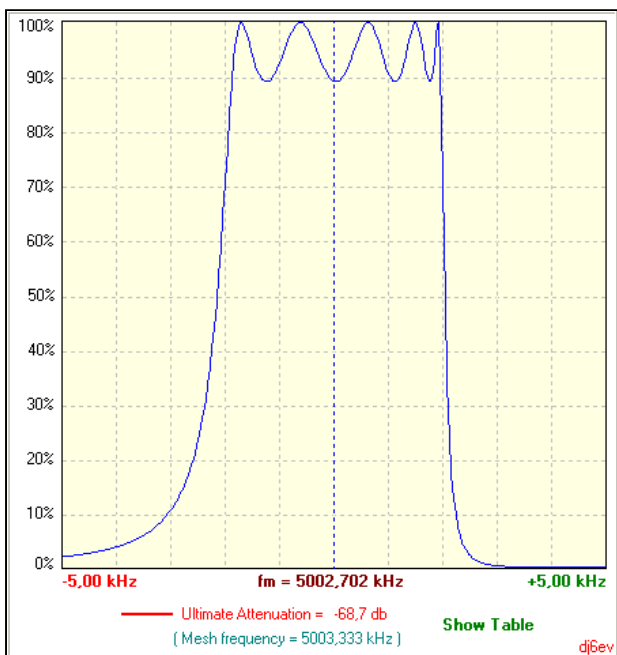
## Die Grafik-Anzeige

Die Grafik zeigt die Durchlasskurve des berechneten Filters. Die Filterkurve ist immer auf die berechnete Mittenfrequenz "fm" zentriert. Die Darstellbreite kann bis 400kHz betragen, wobei die resultierenden Frequenzgrenzen als plus/minus Offsets angezeigt werden. Durch Anklicken von "LOG→Lin" unterhalb des "Calculate" - Buttons kann die Kurve auch mit linearer Skalierung dargestellt werden.

Der Wert der Dämpfungsasymptote ("ultimate attenuation") wird angezeigt und erscheint auch als rote Linie, wenn er innerhalb des 100db-Bereichs liegt. Der Mittelwert der beiden Filterflanken erscheint als grüne Linie ("Symmetry Axis") und ist ein Maß für die Abweichung von einer symmetrischen Kurve.



Ein 5-MHz, 5-Polfilter mit 1db Welligkeit, dargestellt in 10kHz und 100kHz Frequenzbreite



Att(db)	fLow(kHz)	fHi(kHz)	fret(kHz)	Bw(kHz)
-1	5000,826	5004,667	---	3,842
-2	5000,758	5004,686	---	3,929
-3	5000,702	5004,702	---	3,999
-6	5000,555	5004,740	---	4,185
-10	5000,354	5004,790	---	4,436
-15	5000,054	5004,858	---	4,805
-20	4999,668	5004,937	---	5,268
-25	4999,165	5005,026	---	5,861
-30	4998,500	5005,127	---	6,627
-35	4997,600	5005,238	---	7,638
-40	4996,349	5005,358	---	9,010
-45	4994,525	5005,488	---	10,963
-50	4991,674	5005,625	---	13,951
-55	4986,674	5005,769	---	19,095
-60	4975,823	5005,918	---	30,095
-65	4935,363	5006,071	---	70,708
-70	---	5006,227	5204,890	---
-75	---	5006,384	5047,238	---
-80	---	5006,541	5029,069	---
-85	---	5006,698	5022,083	---
-90	---	5006,852	5018,407	---
-95	---	5007,002	5016,153	---
-100	---	5007,148	5014,639	---

Ultimate Attenuation = 68,69 db  
6db / 60db shape factor = 7,191

Die Filterkurve in linearer Darstellung

Die berechneten Werte in Tabellenform, hier mit absoluten Frequenzwerten dargestellt.

## Die Menü - Leiste

SaveWindow Cohn QER(G3UUR) Xtal Table LC-Match Cs2Cp Colours Info Help

### SaveWindow

Ein Klick auf dieses Feld erzeugt ein Bild des gesamten Programmfensters und speichert es im Programmordner als Bitmap-Datei mit dem Namen "Filter.bmp". Zur Anzeige, dass das Bild erzeugt wird, verändert sich die Farbe des Grafikfeldes für einen kurzen Moment. (Eine Kopie liegt dann auch im Windows Clipboard). Alle berechneten Daten inklusive der Maschenfrequenz und der Filterkurve sind daher im Bild für weitere Auswertungen enthalten. Wenn mehrere Bilder erzeugt werden, muss vorher eine evtl. bereits vorhandene Datei umbenannt werden, da sie sonst ohne Vorwarnung überschrieben wird.

### Cohn

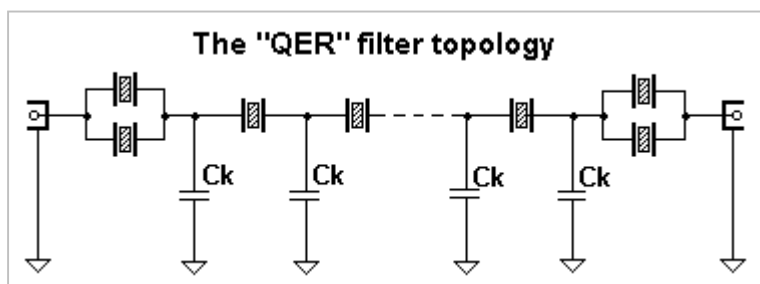
Filter, die die von Seymour Cohn [7] publizierte "minimum-loss" Kopplungsmethode verwenden, sind - speziell als CW-Filter - recht populär geworden, trotz ihrer bekannten Nachteile wie unkontrollierbarer Welligkeit und sehr großer Gruppenlaufzeit-Verzerrungen. Ihre Vorteile sind neben dem einfachen Aufbau mit identischen Koppelkondensatoren die etwas steileren Filterflanken. Im Gegensatz zum allgemeinen Glauben ist allerdings ihre Durchlassdämpfung nicht kleiner als bei den Tschebyscheff- oder Butterworth-Typen. Das liegt an der extremen Schmalbandigkeit der Quarzfilter im Vergleich zu LC-Filtern.

Ein Klick auf dieses Feld öffnet ein eigenes kleines Programmfenster, das vom Hauptprogramm unabhängig ist. Es dient nur zur einfachen Berechnung der Werte für die Koppelkondensatoren und der Abschlussimpedanz. Es wird keine Durchlasskurve generiert.

Selbstverständlich verwendet auch dieses Programm die Dishal-Methode, d.h., die Parallelkapazität  $C_p$  der Quarze wird korrekt berücksichtigt. Daher sind auch hier die errechneten Werte für die Kopplungskapazität und Abschlussimpedanz sehr genau.

### QER(G3UUR)

Diese von G3UUR entwickelte neue Variante des Cohn-Typs verbindet die Einfachheit der identischen Kopplungswerte mit einer drastischen Reduktion der Welligkeit und Gruppenlaufzeitverzerrungen. Zum Beispiel liegt die Welligkeit eines 8-poligen QER-Filters bei nur ca. 0,3db statt der untragbaren 5-6db eines Cohnfilters. Diese "Quasi-Equi-Ripple" - Eigenschaft (QER) wird dadurch erreicht, dass neben anderen Kopplungskoeffizienten und Abschlussimpedanzen die Serien-Endkapazitäten durch einen zweiten Quarz parallel zum jeweiligen Endquarz ersetzt werden - siehe Prinzipschaltbild. Die effektive Polzahl des Filters wird durch die beiden Zusatzquarze nicht erhöht.



Eine ausführliche Information über diesen Filtertyp kann im ARRL-Handbook 2010 [9] und auch in QRP Quarterly [10] gefunden werden. Eine Simulation mit einem Vergleich der Durchlasskurven eines 8-Polfilters in Cohn- und QER-Ausführung ist im Anhang zu sehen.

In diesem Programm wird natürlich ebenfalls die Dishal-Methode für die korrekte Berechnung der Werte für die Koppelkapazität  $C_k$  und die Abschlussimpedanz angewandt.

## Xtal

Öffnet ein Drop-Down-Menü mit zwei Programmen zur einfachen Ermittlung von Quarzparametern und ein drittes für das individuelle "Ziehen" von Quarzen im Filter ("Tuning").

### 3db-Method

Der Rechner verwendet die Messwerte, die in einem passiven Messaufbau mit einem stabilen Signalgenerator und einem Detektor oder Netzwerk-Analysator gewonnen wurden. Es setzt die Anwendung der "3-db"-Methode voraus. Als ein typisches Beispiel von vielen ist eine detaillierte Beschreibung dieser Methode und des zugehörigen Messaufbaus auf der Webseite von K8IQY unter dem Titel "Precision VXO" zu finden:

<http://www.k8iqy.com/testequipment/pvxo/pvxopage.htm>

Das ist nur ein Beispiel aus einer Unzahl von Artikeln über die Messung von Quarzparametern.

### Hinweis:

Der [3db-Method](#) Rechner fordert als Eingabe das direkte Spannungsverhältnis "Uout/Uin [%]", um den Verlustwiderstand Rm zu bestimmen. Wenn Rm direkt durch Substitution – wie von K8IQY beschrieben – ermittelt wird, dann kann man den Wert in diesem Eingabefeld solange justieren, bis der vorgegebene Wert für Rm im Ergebnisfeld angezeigt wird.

Die Genauigkeit der 3db-Methode hängt nicht nur von der Messgenauigkeit für Bandbreite und Dämpfung ab, sondern auch von den möglichst genau bekannten Werten der beiden Abschlusswiderstände.

### G3UUR-Method

Diese wohl populärste Methode verwendet einen Colpitts-Oszillator, bei dem die Schwingfrequenz des Quarzes einmal direkt und einmal mit einem genau bekannten Kondensator in Serie mit dem Quarz gemessen wird. Aus der Frequenzdifferenz lassen sich dann die Kapazität Cm und die Induktivität Lm errechnen. Die Schaltung und die vereinfachten Auswertformeln sind in vielen Publikationen und im Internet zu finden.

Das hier vorliegende Programm verwendet nun nicht mehr die publizierten vereinfachten Formeln, die aber zu relativ ungenauen Ergebnissen führt, sondern eine exakte Berechnung unter Berücksichtigen der Spannungsteilerkapazitäten (nominal je 470pF). Dies ergibt wesentlich genauere Ergebnisse für die Quarzparameter. Wenn aus Kompatibilitätsgründen auf die Ergebnisse der üblichen Berechnung zurückgegriffen werden soll, kann man einfach die Werte für die Spannungsteilerkapazitäten auf "0" setzen.

Obwohl mit diesem Verfahren der Verlustwiderstand und daraus die Güte eines Quarzes nicht direkt ermittelt werden kann, ist es zumindest möglich, durch Messung der Oszillatoramplitude eine qualitative Abschätzung der Quarzaktivität und damit der Güte zu machen. Dies kann zur Sortierung der Quarze nach relativer Güte, bzw. der Aussortierung schlechter Quarze dienen. Dafür ist nur ein einfacher Diodengleichrichter mit angeschlossenem hochohmigen Voltmeter (DVM) nötig.

### Xtal Tuning

Das Programm erlaubt die einfache Berechnung der individuellen Ziehkondensatoren ("series-tuning-Cs") zur Erzielung einer identischen Maschenfrequenz im Filter, wenn die verfügbaren Quarze unterschiedliche Serienresonanzen aufweisen. Seine Anwendung mit einem durchgerechneten Beispiel ist im [Anhang](#) zu finden. Bei dieser Methode können u.U. minimale Abweichungen der Filterkurve auftreten, wenn die Frequenzdifferenz der Quarze relativ groß ist.

## Table

Die Ergebnisse können auch tabellarisch angezeigt werden. Unter "Table" öffnet sich ein Untermenü: "Relative Freqs", "Show/Close Table " und "Save Table as Text". Die entsprechende Tabelle erscheint im Grafikfeld statt der Kurvendarstellung.

Einfacher kann man mit dem Button "Show Table" unterhalb des Grafikfensters zwischen Grafik und Tabelle umschalten. Bei Auswahl "Relative Freqs" im obigen Menü kann die Tabelle zwischen absoluter und relativer Frequenzanzeige umgeschaltet werden.

Der Aufruf von "Save Table as Text" speichert die Tabelle als Textdatei "Tables.txt" im Programmordner. In diesem Fall werden auch alle Quarz- und Filterparameter und natürlich die Werte der Koppel- und Serienkapazitäten mit abgespeichert.

## LC-Match

"LC-Match" öffnet ein separates Programmfenster zur Berechnung der Werte für die entsprechenden LC-Glieder zur Anpassung an Quell- und Lastimpedanz. In bestimmten Fällen kann das gegenüber Transformatoren Vorteile bringen. Beide Versionen des Netzwerks – die Hoch- und Tiefpass-Topologie – werden berechnet und angezeigt. Die Berechnung setzt rein reelle Abschlusswiderstände voraus. Außerdem wird  $R_1$  immer kleiner als  $R_2$  angenommen. Wird die Differenz zwischen Filter- und Abschlussimpedanz **gleich oder kleiner als 1:1.02 ( → return loss 40db)**, dann erscheint die Meldung "No matching network necessary". Eine Anpassung ist dann also unnötig.

Hinweis: Beim Aufruf übernimmt das Programm die Daten für Frequenz und Filterimpedanz aus dem Hauptprogramm und errechnet die erforderlichen Werte für das LC-Netzwerk. Selbstverständlich können danach die Eingaben beliebig für eine universelle Anwendung verändert werden

## Cs2Cp

Rechnet die Serienschaltung  $Cs_1-R_s$  der Filterendglieder in eine entsprechende Parallelschaltung  $C_p-R_p$  um ( $R_s, R_p \rightarrow$  Abschlussimpedanz).

## Colours

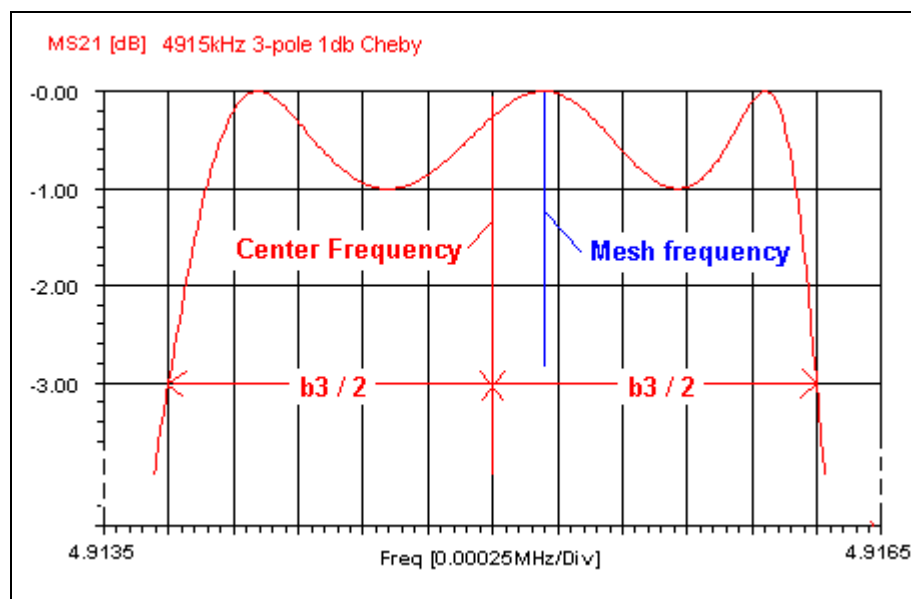
Ein kleines Menü, mit dem die Farbgebung der Grafik-Anzeige beliebig geändert werden kann.

## Anhang

### Filter "Mesh"- und Mittenfrequenz

In normalen LC-Bandpassfiltern des Maschentyps ("mesh" oder "ladder") sind die Mitten- und die Maschenfrequenz identisch. Das ist **nicht** der Fall bei Ladderfiltern mit Quarzen. (Jack Hardcastle, G3JIR, hat auf diese Diskrepanz hingewiesen)

Der Grund dafür ist wieder einmal die unvermeidliche Parallelkapazität  $C_p$ , die nicht nur den bekannten asymmetrischen Verlauf der Filterflanken, sondern auch eine Asymmetrie im Durchlassbereich bewirkt. Da nun die Mittenfrequenz  $f_m$  üblicherweise als die arithmetische Mitte zwischen den 3db-Punkten definiert ist, liegt die Maschenfrequenz bei einem LSB-Filter immer etwas höher als  $f_m$  (bei der USB-Topologie liegt sie immer niedriger). Das folgende Bild eines 3-Pol-Filters vom Tschebycheff-Typ illustriert diesen Effekt – hier liegt die Maschenfrequenz ("mesh frequency") ca. 195Hz höher als die Mittenfrequenz ("center frequency").



Diese "mesh frequency" wird als ein Hinweis immer dann angezeigt, wenn man den Mauszeiger entweder auf die Zahl bei "Center frequency" im Filterparameter-Feld oder auf die gleiche Zahl unterhalb des Grafikbereichs bewegt.

Hinweis: Bei der Erzeugung eines Bildes mittels "SaveWindow" wird die Maschenfrequenz ("Mesh-Frequency") statt der "Symmetry Axis"-Beschriftung abgespeichert.

Die vom Programm errechneten Werte der Serien-C's stellen identische Maschenfrequenzen im Filter sicher. Nur wenn ein zusätzliches "Ziehen" der Frequenz einzelner Quarze vorgesehen ist, könnte folgende Information hilfreich sein:

- 1) Die Maschenfrequenz des Filters wird immer durch die zweite Masche (bzw. der vorletzten, identischen Masche) bestimmt. Sie ist die höchste, weil der zugehörige Quarz auf beiden Seiten in Serie mit den kleinsten Kopplungskapazitäten liegt. Alle anderen Maschen müssen daher mit entsprechenden Serienkapazitäten auf diese Frequenz gezogen werden.
- 2) Die Anwendung des "Xtal Tuning" Programms im "Xtal" Menü zur individuellen Abstimmung von Quarzen mit unterschiedlichen Serienresonanzen auf eine gemeinsame Maschenfrequenz ist auf den folgenden Seiten beschrieben.



## Quarz-Abstimmung mit dem "Xtal Tuning" Programm

Es ist grundsätzlich empfehlenswert, Quarze mit identischer Serienresonanz (und selbstverständlich auch gleicher Induktivität) für ein Ladderfilter auszusuchen. Das macht ein Filterdesign mit dem Dishal-Programm extrem einfach und erzielt die besten Resultate. Die Variation der Quarzfrequenzen sollte maximal  $\pm 2\%$  der gewünschten Bandbreite betragen. Unterschiede von bis zu  $\pm 5\%$  bewirken bereits eine deutlich höhere Welligkeit und Durchlassdämpfung.

Es mag aber Fälle geben, in denen nur Quarze mit einer größeren Frequenzstreuung zur Verfügung stehen. In begrenztem Maße können nun diese Quarze individuell mit Serienkapazitäten, die von den berechneten Idealwerten abweichen, "gezogen" (tuned) werden. Zu diesem Zweck werden im Dishal-Programm neben den Serienkapazitäten  $Cs_x$  auch die zugehörigen Offsetfrequenzen "equivalent offset freq" berechnet und angezeigt.

Diese Zusatzinformation macht es jetzt besonders einfach, das "XtalTuning" Programm für den Abstimmprozess einzusetzen. Die resultierende Filterkurve kann zwar minimale Abweichungen von der Idealkurve aufweisen, z.B., bei der Welligkeit, Bandbreite oder Mittenfrequenz. Diese Abweichungen sind aber im Vergleich zu den Fehlern, die durch die Bauteiltoleranzen und Quarzverluste entstehen, völlig vernachlässigbar. Eine genauere Erläuterung der Ursachen für diese Effekte sprengt den Rahmen dieser Hilfedatei.

Die Vorgehensweise für den Abstimmprozess wird im folgenden Beispiel gezeigt.

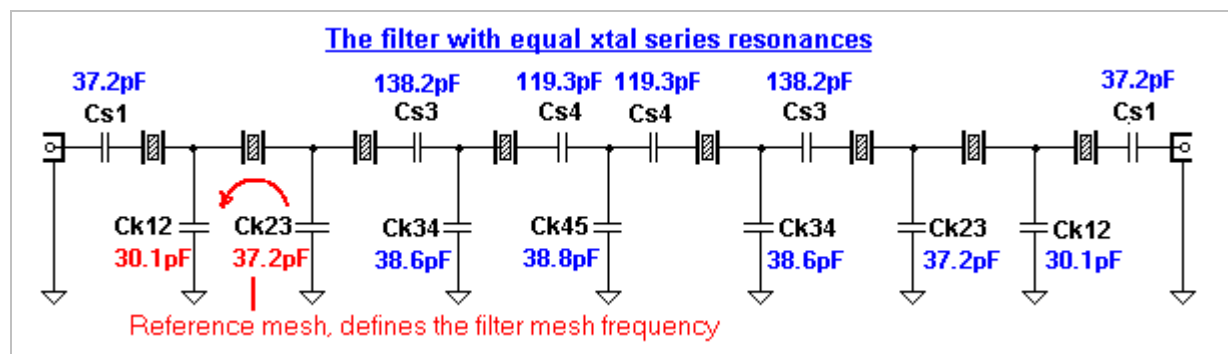
Wir nehmen 8 Quarze mit folgenden Serienfrequenzen (kHz) an:

#1: 4999.670, #2: 4999.895, #3: 5000.010, #4: 5000.120, #5: 5000.235, #6: 5000.320,  
#7: 5000.485, #8: 5000.680. (das ist eine extrem große Spreizung von 1010Hz)

Wir wollen nun ein 8-Pol-Filter mit einer 3db-Bandbreite von 2.5kHz und einer Welligkeit von 0.5db mit den oben aufgeführten Quarzen konstruieren.

Im ersten Schritt wählen wir einen Quarz, dessen Frequenz ungefähr in der Mitte der Frequenzverteilung liegt. Daher nehmen wir Quarz #4 (5000.120kHz) für die Referenzmasche #2, die gleichzeitig auch die "nominal series frequency"  $f_s$  für das Dishal-Programm darstellt.

Mit dem Dishal-Programm berechnen wir nun das Filter unter der Annahme einer gleichen Frequenz  $f_s$  aller Quarze von 5000.120 kHz, einer typischen Induktivität von  $L_m = 70mH$  und einer Parallelkapazität von  $C_p = 3.7pF$ . Wir erhalten folgendes Filter als Resultat:



Die Maschen #2 and #7 sind die einzigen ohne Serienkondensator. Sie bestimmen die Maschenfrequenz des Filters, die als Referenz dient. Daher ist deren Frequenzoffset Null per Definition und auch in der Offset-Liste nicht aufgeführt. Alle anderen Quarze müssen nun mit den Kapazitäten  $Cs_1...Cs_4$  auf diese Referenzfrequenz gezogen werden.

Das Programm liefert uns die Werte der Koppelkondensatoren, die die Filtereigenschaften bestimmen und auch Einfluss auf die Berechnung der Serienkondensatoren haben. Die im Bild gezeigten Werte für Cs1 bis Cs4 sind allerdings hier bedeutungslos, da wir sie ja aufgrund der unterschiedlichen Quarzfrequenzen ohnehin individuell berechnen müssen. Die in der Liste unten daneben gezeigten zugehörigen Frequenzoffsets sind allerdings wichtig, denn diese werden jetzt für den Abstimmprozess gebraucht.

Tuning (Series) Capacitances [pF]		equiv. Freq. Offset [Hz]
Cs1=	37,2	709
Cs3=	138,2	179
Cs4=	119,4	208

Die Werte in den "equiv. Freq. Offset"- Feldern werden nun für den Abstimmprozess im "Xtal Tuning" Programm verwendet.

Die bereits oben errechneten Koppel- (Shunt-) Kapazitäten Ck... werden dabei nicht geändert.

Wir können nun das "Xtal Tuning" Programm in der Menü-Dropdown-Liste aufrufen. Alle notwendigen Startparameter werden dabei automatisch aus dem Dishal Hauptprogramm übernommen. Die einzigen Felder, die im Abstimmprozess geändert werden müssen, sind "**Current Xtal Series Freq.**" und "**Nominal Offset**".

Da Quarz #4 für die Masche #2 benutzt wird, wählen wir Quarz #3 (5000.010kHz) für die Masche auf der anderen Filterseite (mesh n-1 = #7). Wir wissen, dass diese Masche ebenfalls mit einem nominalen Offset von Null definiert ist. Wir übernehmen die Frequenz ('Current Xtal Series Freq.') und den 'Nominal Offset' ins Tuningprogramm und erhalten folgendes Resultat:

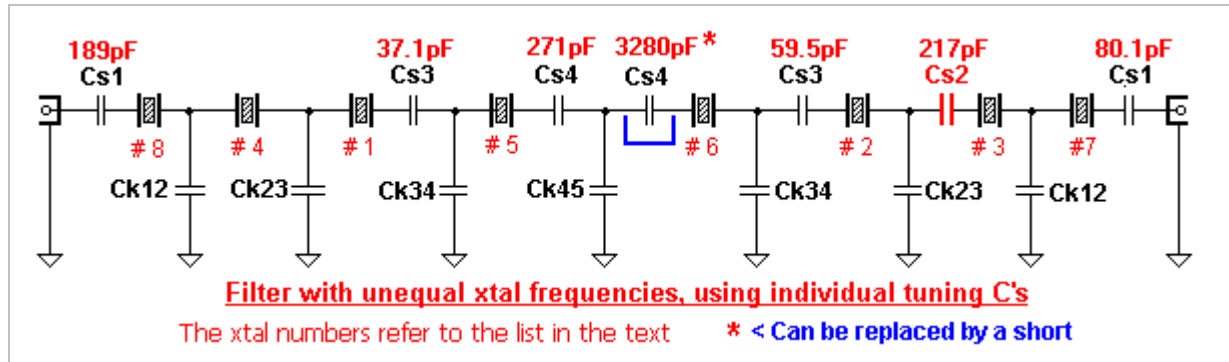
Ck12 30,1 pF Ck23 37,2 pF <- Reference Mesh (#2), defining Fmesh	← Koppelwerte für Masche #2, vom Dishal Programm.
Select either Lm or Cm of xtal <input checked="" type="radio"/> Lm 70 mH <input type="radio"/> Cm Cm = 14,47376 fF	← Diese Frequenz ist die Basis-Serienfrequenz. "fs" im Dishal-Programm für die Berechnung der Koppel-Kapazitäten (und der Serienkapazitäten).
5000,120 kHz Nominal Xtal Series Freq. 3,7 pF Xtal Holder Capacitance Cp	
5000,010 kHz Current Xtal Series Freq.	
Current - Nominal [Hz] -110 Actual Xtal offset [Hz] 110	← Die entsprechenden Offsets, wie sie neben den Serienkapazitäten aufgeführt sind. Spezialfall hier: Null
Nominal Offset in (Hz) 0	
Tuning Capacitance (pF) 217	
Calculate	

**Die Masche #7 benötigt eine Serienkapazität von 217pF.**

Die Maschen an den Filterenden (#1 und #8) benötigen den größten Offset. Daher nehmen wir hierfür die Quarze mit den höchsten Abweichungen von der Nominalfrequenz 5000.120kHz. Das sind die Quarze #7 and #8 (5000.485 und 5000.680kHz). Der benötigte Offset für die End-Maschen ist 709 Hz. Wir geben die Zahlen ins Programm ein und erhalten:

Select either Lm or Cm of xtal <input checked="" type="radio"/> Lm 70 mH <input type="radio"/> Cm Cm = 14,47376 fF	Da der Quarz bereits einen Offset von 560Hz hat, ist nur ein zusätzliches Ziehen von 149Hz nötig. Der Wert des berechneten Serien-Cs ist daher 189 pF.
5000,120 kHz Nominal Xtal Series Freq. 3,7 pF Xtal Holder Capacitance Cp	
5000,680 kHz Current Xtal Series Freq.	
Current - Nominal [Hz] 560 Actual Xtal offset [Hz] 149	Für den Quarz mit 5000.485kHz am anderen Ende des Filters ergibt die Berechnung 80.1 pF für den gleichen nominellen Offset.
Nominal Offset in (Hz) 709	
Tuning Capacitance (pF) 189	
Calculate	

Wir können nun die restlichen Ziehkapazitäten errechnen, was dann dieses Filter ergibt \*:



Dies ist nur ein Beispiel für die Vorgehensweise bei Quarzen mit unterschiedlichen Serienfrequenzen. Man beachte dabei, dass die Quarzfrequenz mit Serienkondensatoren nur "nach oben" gezogen werden kann. Daher kann es im Laufe des Abstimmprozesses passieren, dass die anfänglich gewählten Parameter zu einer Situation führen, bei der der Offset eines Quarzes höher liegt, als es für irgendeine Masche erforderlich ist. In diesem Falle gibt es eine Fehlermeldung, und wir müssen die Prozedur mit einem Quarz wiederholen, dessen Frequenz als Startwert für das Dishal-Programm ("[nominal series frequency fs](#)") etwas höher liegt

Allerdings benötigt eine Neuberechnung mit Hilfe der beiden Programme nur sehr wenig Zeit.

Quarze sollten nicht exzessiv in der Frequenz gezogen werden. Die Quarzgüte sinkt mit zunehmendem Frequenzoffset, d.h., mit abnehmender Serienkapazität. Daher gibt das Programm eine Warnung aus, wenn die Kapazität unter 10pF fällt.

Natürlich gibt es auch noch andere erprobte Werkzeuge für die Berechnung und Abstimmung der individuellen Filtermaschen. Wes Hayward, W7ZOI, hat ein solches Tool zur Berechnung der notwendigen Werte geschrieben. Sein Programm "[FineTune](#)", das dem Buch "[EMRFD](#)" [5] als Teil der "[LADPAC2002](#)" -Software beiliegt oder seine ältere Version "[MeshTune](#)" (DOS) als Bestandteil des Buchs "[RF Design](#)" [6] wurden dafür entwickelt. Da sich die dort angewandte Methode stark von der hier vorgestellten unterscheidet, sollte man die zugehörigen Anleitungen sehr sorgfältig studieren.

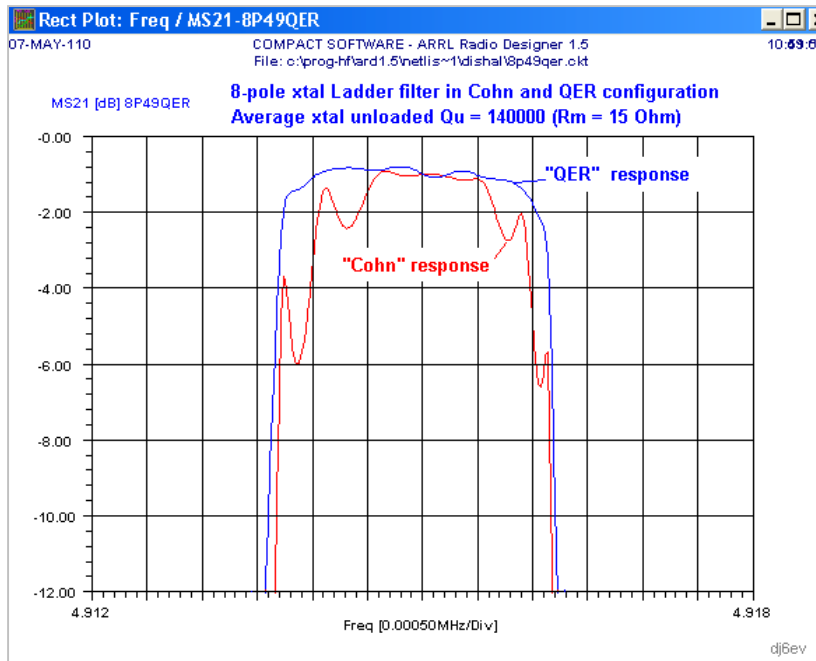
Wer den Aufwand nicht scheut, nahezu ideale Filter durch gezieltes Abgleichen aller Filterkomponenten zu bauen, sollte den Artikel von J. Makhinson, N6NWP [8] lesen, der die Grundlagen und die notwendigen Schritte im Detail beschreibt. Hier sei aber vermerkt, dass N6NWP ebenfalls Quarze mit fast identischen Parametern als Ausgangspunkt verwendet. Sein "fine-tuning" dient zur Kompensation aller Abweichungen von den Idealwerten, um die in seinem Artikel gezeigten exzellenten Filterkurven zu erreichen. Das ist außerordentlich zeitaufwendig und erfordert darüber hinaus zahlreiche sehr genaue Messungen.

\* Das Filter könnte auch ohne Serienkapazitäten konstruiert werden, wenn wir einen Satz von Quarzpaaren mit den vom Dishalprogramm errechneten Frequenzoffsets zur Verfügung hätten. Die Quarze müssen allerdings auch möglichst identische Werte für  $L_m / C_m$  aufweisen (max.  $\pm 2\%$ ). In diesem Beispiel ergäben sich folgende erforderliche Quarzfrequenzen:

2x 5000.120kHz for the meshes 2 and 7(n-1) (as the reference frequency  $f_s$ )  
 2x 5000.829kHz for the meshes 1 and 8 (+ 709 Hz)  
 2x 5000.299kHz for the meshes 3 and 6 (+ 179 Hz)  
 2x 5000.328kHz for the meshes 4 and 5 (+ 208 Hz)

Selbst hier ergeben sich Abweichungen von der idealen Filterkurve, die aber extrem klein sind.

## Quasi-Equiripple (QER) – Filter vs. Cohn-Filter



Das Bild zeigt den Vergleich eines 8-poligen, 2,5kHz breiten Cohnfilters mit einem fast identisch aufgebauten QER-Filter unter Verwendung von verlustbehafteten Quarzen.

Gegenüber der extremen Welligkeit von mehr als 5db und den scharfen Resonanzspitzen, die das Cohnfilter in der Praxis unbrauchbar machen, weist das QER-Filter eine Welligkeit von weniger als 0,5db und sogar eine etwas kleinere Dämpfung auf.

### Ein paar praktische Hinweise

Das Programm "Dishal" setzt verlustlose Resonatoren voraus.

Natürlich weisen reale Filter eine Durchgangsdämpfung und eine Verrundung der Durchlasskurve auf, die hauptsächlich durch die Quarzverluste ( $R_m$ ) hervorgerufen werden. Das führt zu einer etwas kleineren 3db-Bandbreite als berechnet. Allerdings ist dieser Effekt sehr klein verglichen mit den Abweichungen durch die Bauteiltoleranzen. Ein Beispiel: ein Filter wurde für eine 3db-Bandbreite von 2.4 kHz berechnet und zeigte eine reale Bandbreite von 2,36kHz. Bei 6db war die Differenz noch kleiner (<20Hz). Wenn eine garantierte minimale Bandbreite erforderlich ist, kann man einfach die gewünschte 5- oder 6db Bandbreite des Filters als die Design-Bandbreite nehmen.

Außerdem dürfen die Eigenkapazität der Quarzhalterung von ca. 1 bis 2pF und die Streukapazitäten der Zuleitungen in der gleichen Größenordnung nicht vernachlässigt werden, da sie sich zu den Koppelkapazitäten addieren.

Es ist immer empfehlenswert, die berechneten Werte in ein gutes Simulationsprogramm zu übertragen. Damit kann man die Berechnung der Durchlasskurve zuerst mit verlustlosen Quarzen verifizieren und danach die Änderungen an der Filterkurve durch reale Quarzverluste und Variationen der Kapazitätswerte bzw. Abschlussimpedanzen verfolgen.

Horst Steder, DJ6EV    November 2007 (revised January 2009, übersetzt März 2009)  
Überarbeitet Mai 2010 (Vers. 2.0.3)

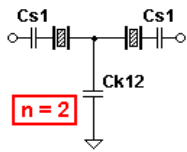
### Anerkennung

Mein besonderer Dank gilt Jack Hardcastle, G3JIR, für die vielen produktiven Diskussionen und den Austausch von zahlreichen Ideen in den letzten Jahren. Er motivierte mich auch, meine Trägheit zu überwinden, um mein uraltes DOS-Programm in diese Windows-Version zu übertragen, "aufzubohren" und zusätzliche Hilfsprogramme in den letzten Monaten hinzuzufügen.

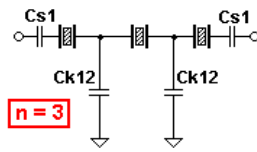
Weiterhin möchte ich Dave Gordon Smith, G3UUR, danken, der mir wertvolle Hinweise bei der Implementation meiner Dishal-Version seines "QER"-Filtertyps und einer genaueren Version seines Oszillatorverfahrens für die Ermittlung der Quarzparameter gab.

### Referenzen (neben vielen anderen Quellen)

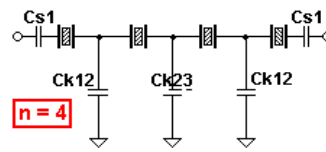
- [1] "Calcul et realisation des filtres à quartz en echelle"  
Patrick Magnin F6HYE, Bernard Borcard F3BB  
Radio – REF, April 1990
- [2] "Computer aided ladder crystal filter design"  
Jack A. Hardcastle G3JIR  
Radio Communication, May 1983
- [3] "Two new equations for the design of filters"  
M. Dishal  
Electrical Communications , Vol.3, December 1955
- [4] "Modern network theory design of single-sideband crystal ladder filters"  
M. Dishal  
Proceedings of the IEEE, Vol.53 , September 1965
- [5] "Experimental Methods in RF Design" ("EMRFD")  
W. Hayward, W7ZOI R. Campbell, KK7B B. Larkin, W7PUA  
ARRL publication No.288, 2003
- [6] "Introduction to Radio Frequency Design"  
Wes Hayward, W7ZOI  
ARRL publication No.191, 1994-96
- [7] "Dissipation Loss in Multiple-Coupled-Resonator Filters"  
Seymour B. Cohn  
Proceedings of the IRE, August 1959
- [8] "Designing and Building High-Performance Crystal Ladder Filters"  
Jacob Makhinson, N6NWP  
QEX No.155, January 1995
- [9] "Crystal Filter Design"  
ARRL HANDBOOK 2010, Chapter 11.6.2
- [10] "Further Thoughts on Crystal Ladder Filter Design"  
Dave Gordon-Smith, G3UUR  
The QRP Quarterly, Spring 2010



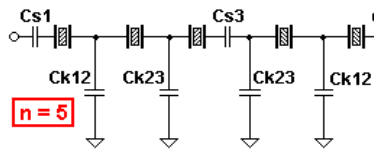
**n = 2**



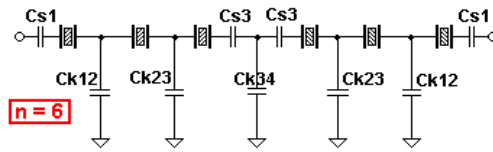
**n = 3**



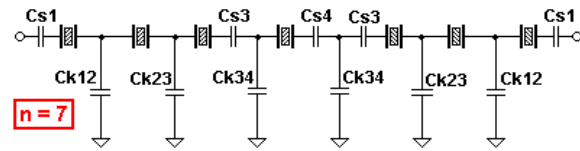
**n = 4**



**n = 5**

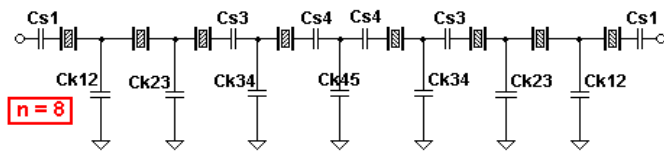


**n = 6**

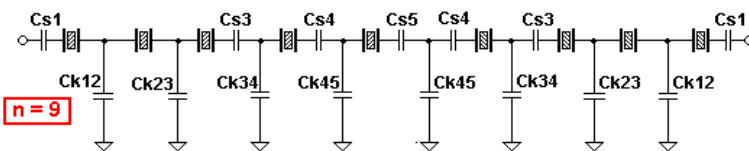


**n = 7**

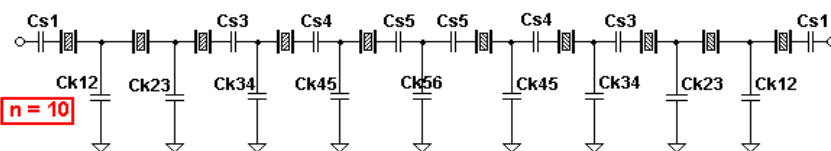
**Zuordnung der Koppel- und Serienkapazitäten für alle Filter mit den Polzahlen von n = 2 bis 14**  
dj6ev



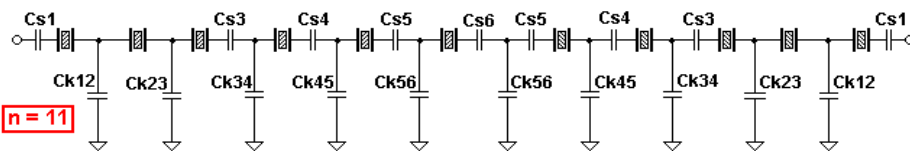
**n = 8**



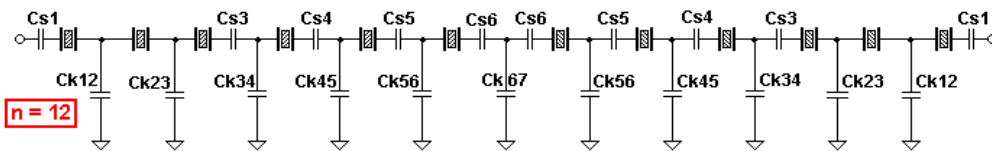
**n = 9**



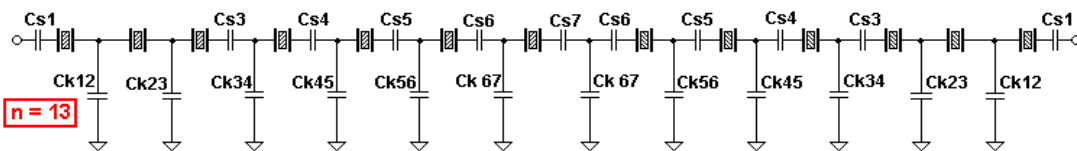
**n = 10**



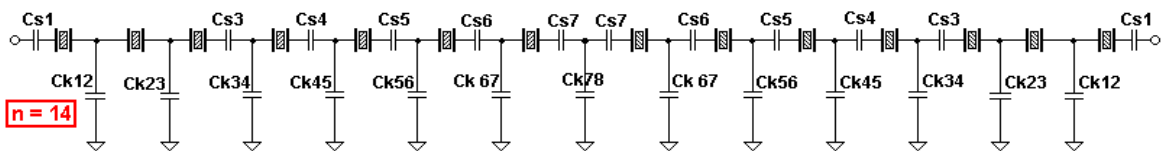
**n = 11**



**n = 12**



**n = 13**



**n = 14**