

# Moderne Quarzfilter (für den Langwellenbereich)

Bernd NEUBIG

Tele-Quarz GmbH, Neckarbischofsheim

## 1. Zusammenfassung

Quarzfilter werden in der Nachrichtentechnik, in der Navigation sowie in der Meßtechnik eingesetzt. In der Nachrichtentechnik finden sie ihre Anwendung in der Telekommunikation sowie in der allgemeinen Hochfrequenztechnik und der Satellitenkommunikation sowie bei portablen und mobilen Funkdiensten, seien es landgeschützte Funkdienste, Seefunkdienste oder Flugfunkdienste. Hier werden sie entweder als ZF-Filter oder als Antennenfilter eingesetzt. Im vorliegenden Beitrag werden besondere Aspekte für die Anwendung als Selektionsmittel in Funkuhren behandelt. Der Bericht beschreibt verschiedene Schaltungsarten wie diskrete und aktive Quarzfilter und ihre wichtigsten Grundschaltungen.

Entsprechend den verschiedenen Anwendungsgebieten unterscheidet man zwischen reinen Selektionsfiltern, Linearphasenfiltern und Selektivlinearphasenfiltern mit Übergangscharakteristiken. Die Realisierbarkeitsgrenzen von Quarzfiltern werden besprochen und in einem Übersichtsdiagramm dargestellt.

Schließlich werden die Dimensionierungsformeln für Quarzfilter mit 1 Quarz und 2 Quarzen in Brückenschaltung angegeben. Für die Anwendung als Selektionsmittel in Funkuhren für DCF 77 werden Dimensionierungsbeispiele vorgestellt.

## 2. Technologien von Quarzfiltern

### 2.1 Diskrete Quarzfilter

Diskrete Quarzfilter sind elektrische Netzwerke bestehend aus einzelnen Quarzvibratoren sowie Spulen und Kondensatoren. Die gängigste Schaltungsform ist die Brückenschaltung. Ihre allgemeine Grundform ist die symmetrische Vollbrücke, elektrisch gleichwertig sind die Differentialalbrücke (Jaumann-Brücke) und das überbrückte T-Glied (siehe Abbildung 1). Für Quarzbandfilter wird fast immer die Differentialbrückenschaltung verwendet, wobei in diesem Zweig ein oder mehrere Quarze liegen und für höhere Selektion meist mehrere derartige Stufen hintereinander geschaltet werden. Die Differentialübertrager werden dabei als abgestimmte Parallelresonanzkreise betrieben. Bild 2 zeigt diese sogenannte Schmalbandausführung. Für Filter größerer Bandbreite ist zur Neutralisierung der statischen Kapazität eine Spule parallel zu dem Quarz zu schalten, die zur Vereinfachung auch "herausgezogen" werden kann und durch den abgestimmten Differentialübertrager absorbiert wird. Mit Quarzbrückenfiltern läßt sich die größtmögliche Vielzahl an Filtercharakteristiken und der weitest mögliche Bandbreitenbereich realisieren.

Quarzbandfilter können jedoch auch als Abzweigschaltung realisiert werden, wie das in Abbildung 3 dargestellt ist. Je nach Schaltungsvariante erhält man entweder USB- oder OSB-Filter oder Filter mit Dämpfungspolen auf beiden Flanken. Der Nachteil dieser Filter ist jedoch, daß die Maximal-Bandbreite nur etwa 1/5 der Bandbreite von Brückenfiltern in Schmalbandschaltung entspricht und nicht jede beliebige Filtercharakteristik realisiert werden kann.

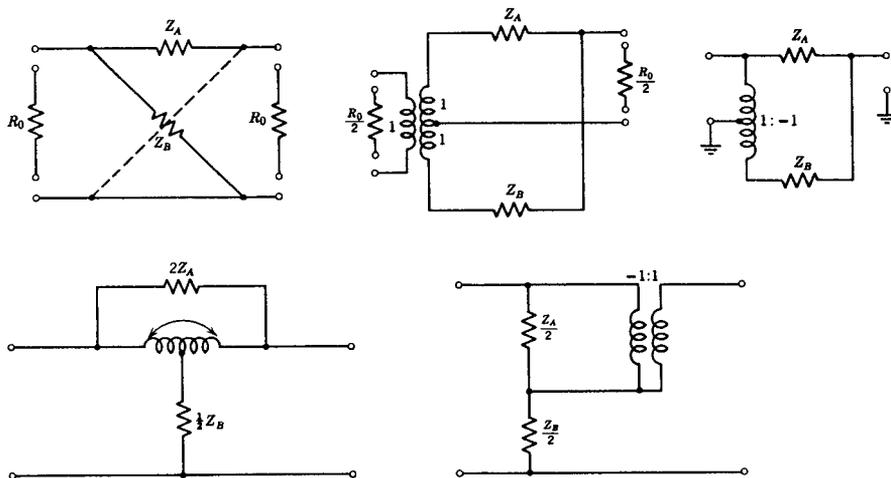


Abb. 1: Brückenschaltungen

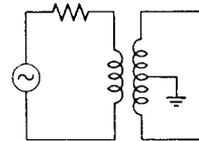


Abb. 2: Quarzfilter-Grundschaltung  
Differentialbrücke  
Schmalbandfilter

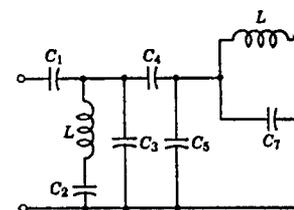
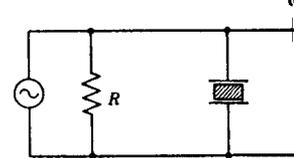
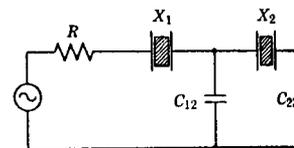


Abb. 3: Abzweigschaltungen

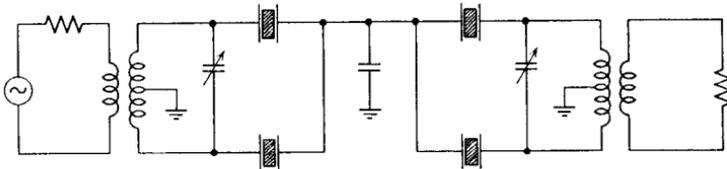
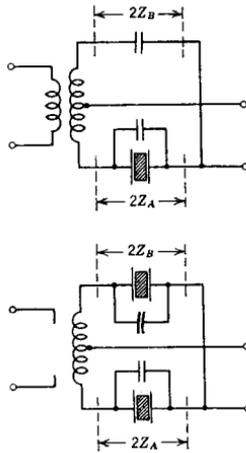


Abb. 2: Quarzfilter-Grundsaltungen:  
Differentialbrücke  
Schmalbandfilter

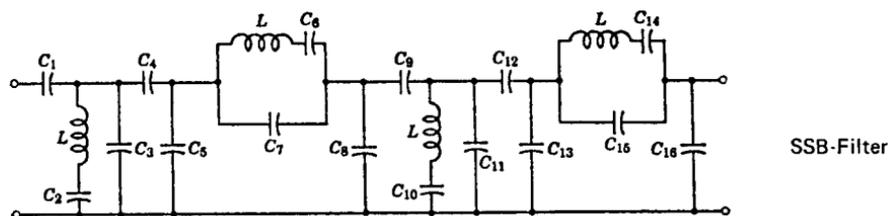
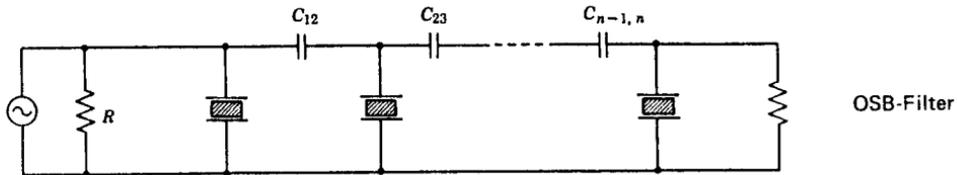
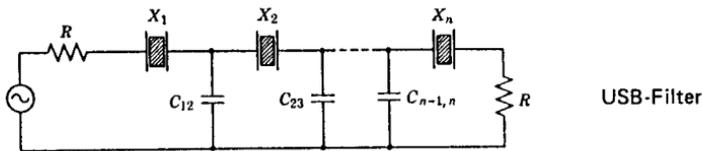


Abb. 3: Abzweigschaltungen

## 2.2 Monolithische und polyolithische Quarzfilter

Bei einem monolithischen Quarzvibrator sind mehrere Resonatorzonen auf einer Quarzscheibe angebracht, die untereinander über die Quarzscheibe mechanisch gekoppelt sind. Die gängigste Ausführung sind die 2-poligen Resonatoren, die sogenannten Duals (Abbildung 4).

Mehrpolige Charakteristiken erhält man, wenn man mehrere Duals über Koppelkondensatoren hintereinander schaltet, wie das in Abbildung 5 dargestellt wird. Ein solches Filter nennt man ein polyolithisches Quarzfilter. Dies ist die gängige Schaltung der heute in den meisten FM-Funkgeräten gebräuchlichen ZF-Filter bei 10,7 MHz bzw. 21,4 MHz.

## 2.3 Aktive Quarzfilter

Durch Einsatz von aktiven Bauelementen als Differenzverstärker, Gegentaktverstärker bzw. Konstantstromquellen lassen sich in einigen Fällen von Schmalbandfiltern der Differentialübertrager und die übrigen Spulen von Diskretfiltern in Brückenschaltung ersetzen. Dies führt zu Prinzipschaltungen wie in Abb. 6. Zu beachten ist allerdings, daß die durch die Filtersynthese vorgegebenen Abschlußimpedanzen bezüglich Realteil und Imaginärteil von den aktiven Stufen auf beiden Seiten des Quarzfilters realisiert werden müssen. Dies bedeutet u. U. relativ große Eingangs- und Ausgangsimpedanzen als auch sehr kleine (oder sogar negative) Eingangs- und Ausgangskapazitäten, die dann die Einführung zusätzlicher Induktivitäten erforderlich machen, wodurch der Vorteil der aktiven Schaltung entfällt. Daher können aktive Quarzfilterstufen nur bei sehr schmalbandigen Filtern angewandt werden.

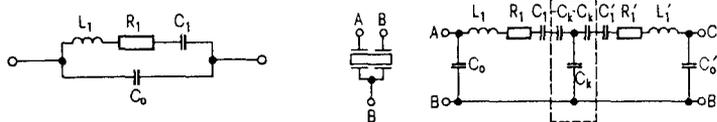


Abb. 4: Monolithische Quarzfilter (Duals)

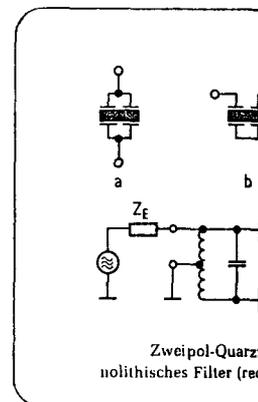


Abb. 5: Polyolithisches Quarzfilter

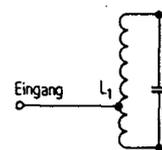


Abb. 6: Realisierungsmöglichkeiten

## 3. Unterscheidung von Selektionsfiltern und Phasengang

Je nach Anwendungsfall sind die Charakteristiken von Selektionsfiltern zu unterscheiden.

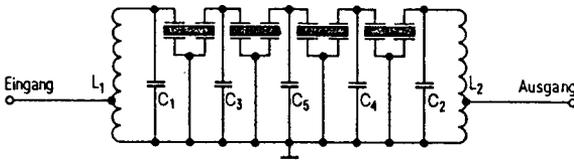
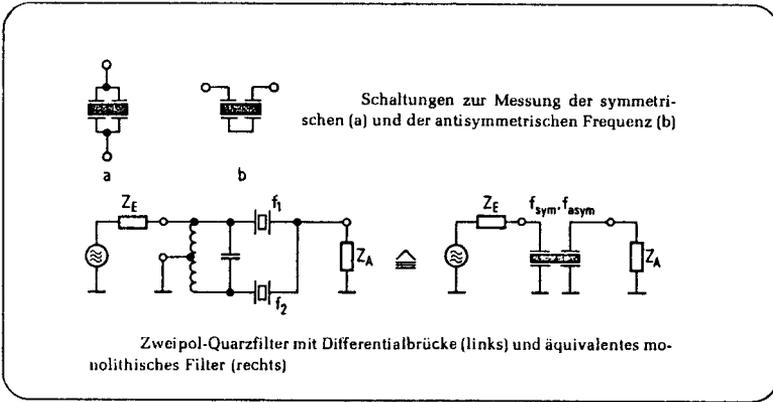


Abb. 5: Polyolithisches Quarzfilter

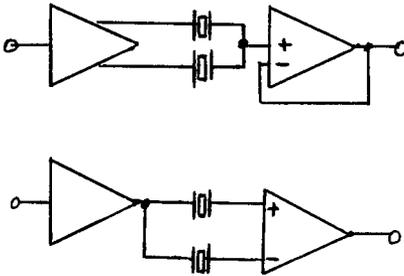


Abb. 6: Realisierungsmöglichkeiten von aktiven Quarzfiltern

### 3. Unterscheidung der Quarzfilter nach ihrem Amplituden- und Phasengang

Je nach Anwendungsfall der Quarzfilter unterscheidet man zwischen reinen Selektionsfiltern, Linearphasenfiltern und Übergangscharakteristiken.

### 3.1 Selektionsfilter

Bei diesen soll ein schmales Frequenzband möglichst wirkungsvoll aus einem Frequenzgemisch herausgefiltert werden. Geeignete Filter haben einen möglichst flach verlaufenden Durchlaßbereich, steil abfallende Flanken und hohe Sperrdämpfung. Die gebräuchlichen Filtercharakteristiken sind (nach aufsteigender Selektivität) Butterworth-, Tschebycheff- und Cauer- (sogenannte "elliptische") Filter. Die erzielbare Flankensteilheit ist um so größer, je mehr Quarze verwendet werden (höhere Polzahl). Abbildung 7 zeigt den Sperrdämpfungsverlauf von 6-Pol-Filtern der angegebenen Charakteristiken. Die gebräuchlichsten sind die Tschebycheff-Filter; durch Variation der theoretischen Durchlaßwelligkeit ("ripple") können Übergangscharakteristiken zwischen Tschebycheff- und Butterworth-Filtern realisiert werden.

Bei höchsten Selektionsanforderungen werden Cauer- (elliptische) Filter eingesetzt, die jedoch wegen ihrer größeren Empfindlichkeit einen höheren Abgleichaufwand erfordern.

Für die meisten Anwendungen sind 2- bis 8-Pol-Filter ausreichend, für Sonderanwendungen können Filter höherer Ordnung (z. B. bis 16 Pol) realisiert werden.

### 3.2 Linearphasenfilter

Als Selektionsmittel bei der Übertragung von klirrfreien Signalen und digitalen Datensignalen können die bisher genannten Charakteristiken nicht verwendet werden, da bei diesen die Phase im Durchlaßbereich stärkere Nichtlinearitäten aufweist, mit anderen Worten, die Gruppenlaufzeit ändert sich sehr stark (siehe Abb. 9). Für eine möglichst unverzerrte Übertragung ohne Überspringen usw. sind Quarzfilter mit linearem Phasengang im Durchlaßbereich, d. h. Gauss- und Bessel-Filter, notwendig, die jedoch eine relativ geringe Selektivität besitzen (siehe Abbildung 8).

### 3.3 Übergangsfiler

Grundsätzlich läßt sich nicht gleichzeitig extrem hohe Selektivität und ein linearer Phasengang (konstante Gruppenlaufzeit) realisieren. Es gibt jedoch eine Reihe von sogenannten Übergangscharakteristiken, bei denen die Gruppenlaufzeit im Durchlaßbereich geebnet ist und erst außerhalb stärker ansteigt, wodurch relativ steile Flanken erreicht werden können. Auf diese Sonderformen kann in diesem Rahmen nicht im einzelnen eingegangen werden.

6-POLE

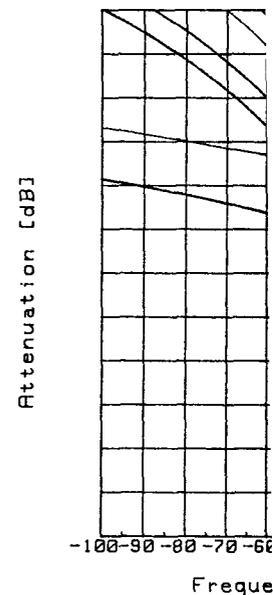


Abb. 7a

6-POLE

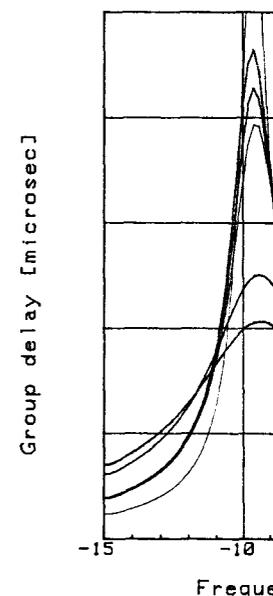


Abb. 7b

### 6-POLE FILTERS WITH DIFFERENT SELECTIVITY

$F_0 = 10 \text{ MHz}$  / Bandwidth =  $\pm 10 \text{ kHz}$

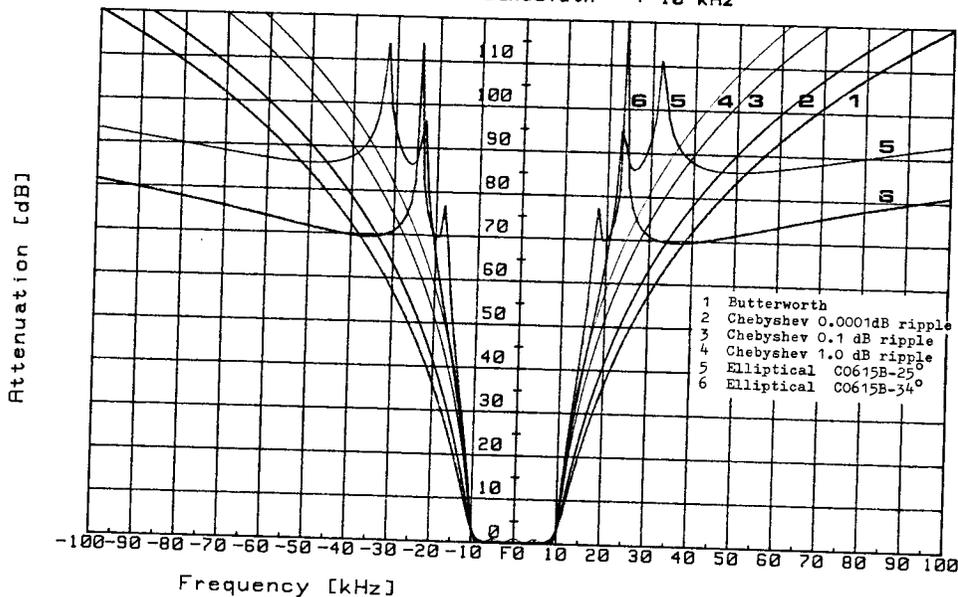


Abb. 7a

### 6-POLE FILTERS WITH DIFFERENT SELECTIVITY

$F_0 = 10 \text{ MHz}$  / Bandwidth =  $\pm 10 \text{ kHz}$

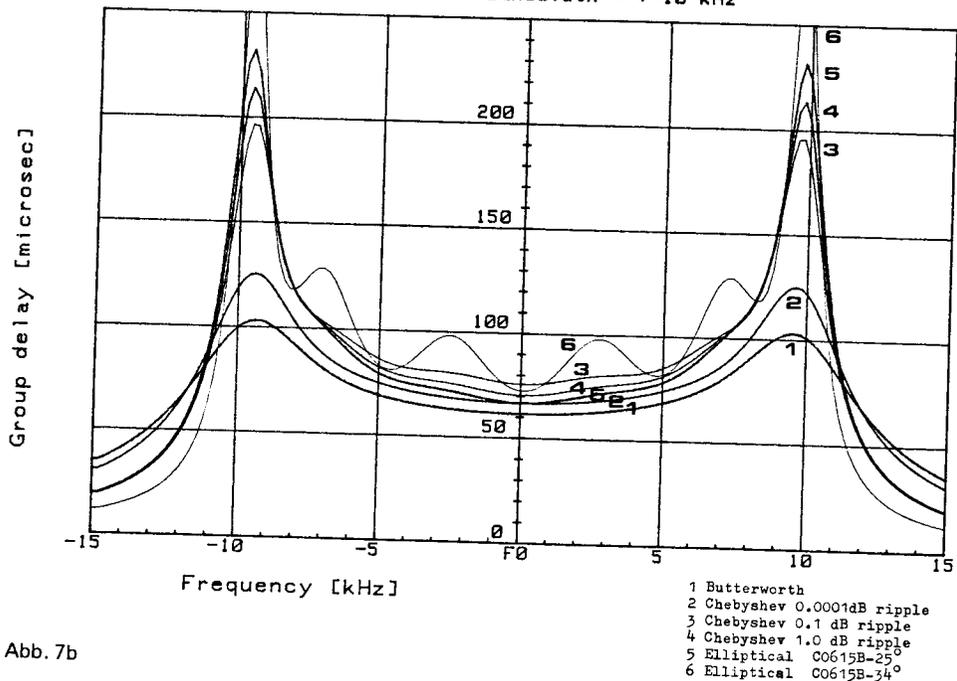


Abb. 7b

## 6-POLE LINEAR PHASE FILTERS

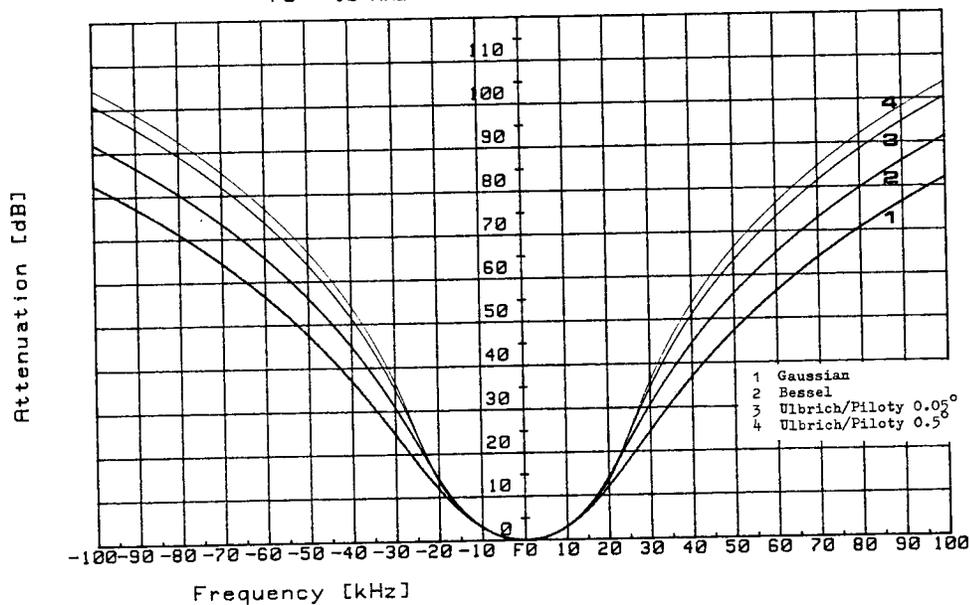
F<sub>0</sub> = 10 MHz / Bandwidth = ±10 kHz

Abb. 8a

## 6-POLE LINEAR PHASE FILTERS

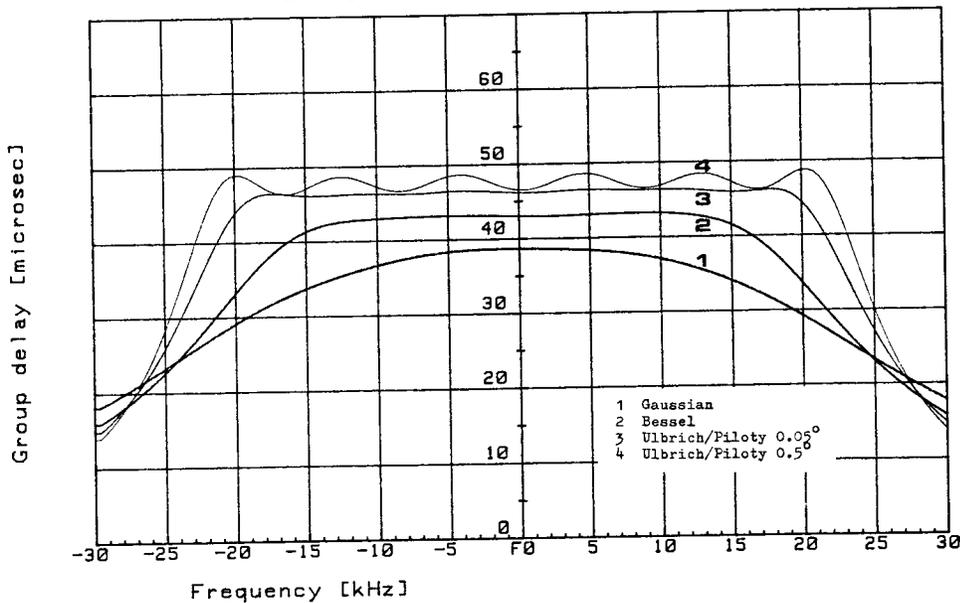
F<sub>0</sub> = 10 MHz / Bandwidth = ±10 kHz

Abb. 8b

## 4. Realisierbarkeits

Die Domäne von Qu...  
nen die hohe Freq...  
nutzt wird. Die H...  
den Temperaturgan...  
ten Filtern, die...  
werden, sollte di...  
ten. Für Anwendun...  
die Untergrenze !!

Je kleiner die Ba...  
Quarzgüte. Unzure...  
terdurchlaßkurve...  
sich der Rechteck...  
Filter, weniger s...  
förmigen Durchlaß...

Durch die Techni...  
es möglich, auch...  
Durchlaßkurve zu...  
erhöhten Grunddäm...  
angewandt.

Die größtmögliche...  
ren:

- Das Ka...  
Schwim...
- die Ne...
- Die Gü...  
tialüß...
- und de...

Das Quarzfilterde...  
als Schmalbandfi...  
schaften durch di...  
nur unwesentlich

Mit einem speziell...  
breiten zwischen...  
ze). Bei diesen H...  
mehr durch die Et...

Zwischen der maxi...  
der minimal mögli...  
der sogenannten m...  
siert, daß das un...  
ze "aufgebessert"...  
(insbesondere we...  
stark verzerren li...  
gestellt, aus dem...

#### 4. Realisierbarkeitsgrenzen von Quarzbandfiltern

Die Domäne von Quarzbandfiltern sind schmalbandige Filter, bei denen die hohe Frequenzstabilität und Güte von Schwingquarzen ausgenutzt wird. Die kleinstmögliche Bandbreite ist durch die Güte und den Temperaturgang der Quarze bestimmt. Bei nicht-thermostatisierten Filtern, die in einem engen Raumtemperaturbereich betrieben werden, sollte die Relativbandbreite  $20 \times 10^{-6}$  nicht unterschreiten. Für Anwendungen mit weiteren Arbeitstemperaturbereichen ist die Untergrenze  $50 \times 10^{-6}$ .

Je kleiner die Bandbreite ist, um so höher ist die erforderliche Quarzgüte. Unzureichende Quarzgüte führt zur Verrundung der Filterdurchlaßkurve, am stärksten bei Filtercharakteristiken, die sich der Rechteckform stark annähern wie Cauer- und Tscheycheff-Filter, weniger stark bei Linearphasen-Filtern, die einen glockenförmigen Durchlaßbereich haben (vgl. Abb. 12).

Durch die Technik der Verlust-Vorverzerrung ("pre-distortion") ist es möglich, auch bei unzureichender Quarzgüte eine unverzerrte Durchlaßkurve zu bekommen, jedoch nur um den Preis einer weiter erhöhten Grunddämpfung. Diese Technik wird daher nur sehr selten angewandt.

Die größtmögliche Bandbreite ergibt sich durch verschiedene Faktoren:

- Das Kapazitätsverhältnis  $r = C_0 : C_1$  der Schwingquarze
- die Nebenresonanzen der Quarze
- Die Güte der verwendeten Spulen und Differentialübertrager
- und den Temperaturgang der Induktivitäten.

Das Quarzfilterdesign erfolgt in der überwiegenden Zahl der Fälle als Schmalbandfilter-Entwurf, hier werden alle Selektionseigenschaften durch die Quarze bestimmt, die übrigen Bauelemente tragen nur unwesentlich dazu bei.

Mit einem speziellen Breitbanddesign ist es möglich, Relativbandbreiten zwischen 0,5 % bis 1,5 % zu realisieren (Grundwellenquarze). Bei diesen Filtern wird die Selektion allerdings mehr und mehr durch die Eigenschaften der verwendeten Spulen bestimmt.

Zwischen der maximal möglichen Bandbreite der Schmalbandfilter und der minimal möglichen Bandbreite der Breitbandfilter ist die Lücke der sogenannten mittelbreiten Filter. Sie werden dadurch realisiert, daß das unzureichende Kapazitätsverhältnis der Schwingquarze "aufgebessert" wird durch zusätzliche Spulen, deren Verluste (insbesondere wegen der hohen Filterimpedanz) die Durchlaßkurven stark verzerren können. In Bild 9 ist ein Übersichtsdiagramm dargestellt, aus dem die einzelnen Bandbreitenbereiche ablesbar sind.

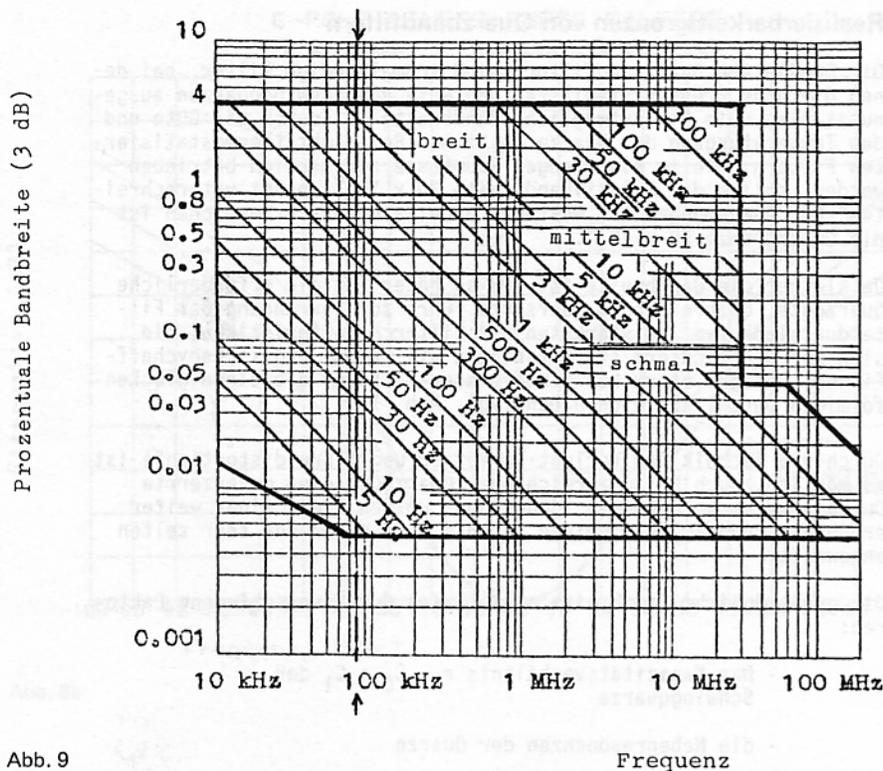


Abb. 9

## 5. Berechnungsbeispiele

### 5.1 Schwingquarze im Bereich um 77,5 kHz

Für die Anwendung in Funkuhren, z. B. bei 77,5 kHz, können als Quarzvibratoren Längsdehnungsschwinger im sog. 5<sup>0</sup>X-Schnitt verwendet werden. Sie sind von den elektrischen Daten zwar optimal, da das niedrige Kapazitätsverhältnis  $C_0/C_1$ , größere Relativbandbreiten und eine relativ niedrige Filterimpedanz zuläßt, jedoch sind sie recht voluminös und mechanisch sehr empfindlich.

Für die Miniaturisierung sowie für portable und mobile Anwendungen wesentlich besser geeignet sind spezielle Quarz-Stimmgabelresonatoren. Sie sind sehr klein und robust, durch ihre kleine dynamische Kapazität und das ungünstigere Kapazitätsverhältnis lassen sich jedoch nur recht kleine Bandbreiten bei einer ca. 60-fachen Filterimpedanz realisieren. Die typischen Ersatzdaten beider Resonatortypen sind in der Tabelle Bild 10 gegenübergestellt.

Tabelle

Dynamische Kapazität	
"	Induktivität
Statische Kapazität	
Resonanzwiderstand R	
Güte Q	
Gehäusegröße	

Abb. 10: Daten von Schwingquarzen  
(1) 5<sup>0</sup>X-Längsdehnungsschwinger  
(2) Quarz-Stimmgabelresonator

Der Temperaturbereich nach unten geht von -20°C und +70°C +/- 4 Hz resp. geeigneten Quarz bieten, damit der laßbereich für

### 5.2 Filter mit 1

Mit einer Diff. eines Quarz u. mit 1 Dämpf. des Kondensat.

Die Bandbreite, falls eine kann (zusammen Eingang und A weils mit dem dieser Anteil Schaltkapazität Differentialü abgestimmt, w gegen die Fil wird bei einer 5. Harmonische 625 Hz oberhalb

Tabelle

	1	2
Dynamische Kapazität $C_1$	ca. 80 fF	1,35 fF
" Induktivität $L_1$	ca. 50 H	3100 H
Statische Kapazität $C_0$	ca. 17 pF	1,25 pF
Resonanzwiderstand $R_1$	typ. 1,2 kOhm	typ. 17 kOhm
Güte $Q$	typ. 20.000	typ. 90.000
Gehäusegröße	51,5 x 19,5 x 9,5	8,4 x 4,0 x 2,0

Abb. 10: Daten von Schwingquarzen bei 77,5 kHz  
 (1) 5<sup>0</sup>X-Längsdehnungsschwinger  
 (2) Quarz-Stimmgabelresonator

Der Temperaturgang der Frequenz ist in beiden Fällen eine nach unten geöffnete Parabel, bei der in einem Temperaturbereich von  $-5^{\circ}\text{C}$  bis  $+55^{\circ}\text{C}$  typisch 50 ppm und zwischen  $-20^{\circ}\text{C}$  und  $+70^{\circ}\text{C}$  100 ppm anzunehmen sind, was bei 77,5 kHz  $\pm 4$  Hz resp.  $\pm 8$  Hz bedeutet. Die Bandbreite eines geeigneten Quarzfilters sollte also ausreichend Reserve bieten, damit das empfangene Signal stets in den Durchlaßbereich fällt.

## 5.2 Filter mit 1 Quarz

Mit einer Differentialbrückenschaltung gemäß Bild 11 mit einem Quarz und einem Kondensator  $C_2$  kann ein Bandfilter mit 1 Dämpfungspol realisiert werden, der durch Abgleich des Kondensators eingestellt wird.

Die Bandbreite wird durch die Kapazität  $C_0$  sowie gegebenenfalls einer Parallelkapazität  $C_{\text{Zus}}$  bestimmt. Letztere kann (zusammen mit einem gleich großen Anteil von  $C_2$ ) am Eingang und Ausgang "herausgezogen" werden, wo sie jeweils mit dem Wert  $2 \times C_{\text{Zus}}$  erscheint. In der Praxis wird dieser Anteil dann durch die Eingangs-/Ausgangs- und Schaltkapazitäten der benachbarten Stufen gebildet. Der Differentialübertrager und der Ausgangskreis sind auf  $f_0$  abgestimmt, wobei ihr Resonanzwiderstand  $R_1 = Q \times \omega L$  groß gegen die Filterimpedanz  $R_T$  sein soll. Der Dämpfungspol wird bei einem 77,5 kHz-Filter zweckmäßigerweise auf die 5. Harmonische der TV-Zeilenablenkfrequenz gelegt, die 625 Hz oberhalb von 77,5 kHz liegt.

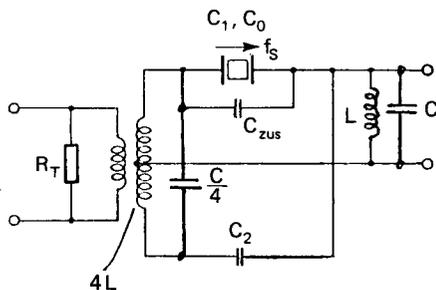


Abb. 11

Für eine Mittenfrequenz  $f_0$ , eine Bandbreite von  $2b$  und eine dynamische Kapazität<sup>0</sup> des Quarzes  $C_1$  ergibt sich:

$$\text{Resonanzfrequenz } f_s = f_0 - b \text{ (Serienresonanz)}$$

$$\text{Abschlußimpedanz } R_T = \frac{2b}{2\pi \cdot f_0 \cdot C_1}$$

$$\text{Parallelkapazität } C_0 + C_{zus} = C_1 \times \frac{f_0}{4b}$$

$$\text{Kondensator } C_2 = C_0 + C_{zus} = C_1 \times \frac{f_0}{4b}$$

Beispiel Miniaturquarz:

$$f_0 = 77,5 \text{ kHz}$$

$$2b = 20 \text{ Hz}$$

$$C_1 = 1,35 \text{ fF}$$

$$C_0 = 1,25 \text{ pF}$$

$$C_2 = C_0 + C_{zus} = 2,62 \text{ pF}$$

$$C_{zus} = 2,62 \text{ pF} - 1,25 \text{ pF} = 1,37 \text{ pF}$$

Um einen Dämpfungspol bei  $f_0 + 625 \text{ Hz}$  zu erzeugen, ergibt sich für  $C_2$  ein gegenüber  $C_0 + C_{zus}$  um  $0,08 \text{ pF}$  geringerer Wert, was durch (empfindlichen) Abgleich eingestellt werden kann.

Der Wert  $C_{zus}$  wird als  $2 \cdot C_2 = 2,7 \text{ pF}$  "herausgezogen" und durch die Schaltkapazitäten etc. gebildet;  $C_2$  reduziert sich dann ebenfalls auf  $1,25 \text{ pF}$ .

Spulen:  $R_p > 10 \times R_T \approx 4 \text{ M}\Omega$ , bei  $Q = 200$  wird

$$L = \frac{R}{\omega \times Q} = 41 \text{ mH}, C = 102,9 \text{ pF}$$

Die realisierbare Bandbreite ist bei Berücksichtigung der Quarztoleranzen sehr knapp!

5.3

Filter mit 2

Die Schaltung  
Dämpfungspol  
quenz erzeug  
lauten dann.

Quarzfrequenz

Abschlußimpedanz

Parallelkapazität  
ohne PolstellenMit Polstellen  
täten zu: $C_0 + C_{zus} =$  $C_0 + C_{zus} =$ wobei  $k = \sqrt{Q}$ 

Beispiel:

$f_0$   
 $2b$   
 $C_1$   
 $C_0$

ergibt:

$f_{S1}$   
 $f_{S2}$   
 $R_T$   
 $C_{pa}$

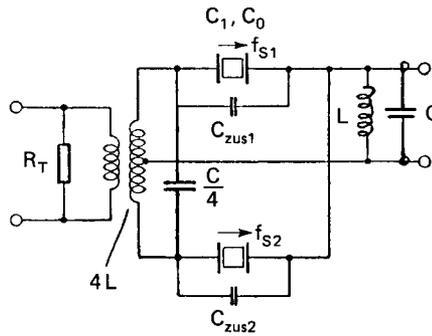


Abb. 12

### 5.3 Filter mit 2 Quarzen

Die Schaltung entspricht Bild 12. Es können damit zwei Dämpfungspole z. B. im Abstand  $\pm p$  von der Mittenfrequenz erzeugt werden. Die Dimensionierungsgleichungen lauten dann:

$$\text{Quarzfrequenzen: } f_{S1} = f_0 - b$$

$$f_{S2} = f_0$$

$$\text{Abschlußimpedanz: } R_T = \frac{b}{2\pi \cdot f_0^2 \cdot C_1}$$

$$\text{Parallelkapazitäten: } C_{\text{par}} = C_1 \times \frac{f_0}{2b} \text{ (beide Zweige) ohne Polstellen}$$

Mit Polstellen bei  $\pm p$  ändern sich die Parallelkapazitäten zu:

$$C_0 + C_{\text{zus1}} = \frac{C_{\text{par}}}{k} \text{ (oberer Zweig)}$$

$$C_0 + C_{\text{zus2}} = C_{\text{par}} \times k \text{ (unterer Zweig)}$$

$$\text{wobei } k = \frac{q}{\sqrt{q^2 - 1}} \text{ mit } q = \frac{p}{b}$$

Beispiel:

$$f_0 = 77,5 \text{ kHz}$$

$$2b = 60 \text{ Hz}$$

$$C_1 = 1,35 \text{ fF}$$

$$C_0^1 = 1,25 \text{ pF}$$

ergibt:

$$f_{S1} = 77,470 \text{ kHz}$$

$$f_{S2} = 77,500 \text{ kHz}$$

$$R_T = 588,9 \text{ k}\Omega$$

$$C_{\text{par}} = 1,74 \text{ pF}$$

Dämpfungspole bei +/- 625 Hz:  $q = \frac{625}{30} = 20,833$

$$k = 1,001154$$

$$C_o + C_{zus1} = 1,74174 \text{ pF}$$

$$C_o + C_{zus2} = 1,74576 \text{ pF}$$

$C_{zus}$  beträgt also jeweils ca. 0,5 pF und ergibt "herausgezogen" 1 pF für die Schaltkapazitäten. Der Unterschied der beiden Kapazitäten ist äußerst gering, der Abgleich der Dämpfungspole somit delikant.

Für die Berechnung der Abschlußkreise ergeben sich die gleichen Gesichtspunkte wie beim ersten Beispiel.

## 6. Literaturliste

- 1) Zverev, A. I.: Handbook of Filter Synthesis  
John Wiley and Sons (1967)
- 2) Saal, R.: Handbuch zum Filterentwurf  
AEG Telefunken (1979)
- 3) IEC-Publikation 369-2-1, Piezoelectric Filters, Part 2:  
Guide to the use of piezoelectric filters (1986)
- 4) DIN 45 165: Filter mit piezoelektrischen Vibratoren,  
Quarzfilter; Begriffe (Mai 1973)
- 5) TELE QUARZ Katalog 1986: Technische Einführung Quarzfilter  
S. 92 ff
- 6) Neubig, B.: Monolithische Quarzfilter  
Funkschau, H. 10 (1978), S. 438 ff.
- 7) Neubig, B.: Optimale ZF-Selektion für Kohärent-Telegrafie (CCW)  
UKW-Berichte, H. 1, S. 35 ff