

Piezokeramik, keramische Filter

Fi 82

2 Blätter

1 LC-Filter (Reaktanzfilter), Quarzfilter, keramische Filter

Bis vor kurzem wurden in den Zwischenfrequenz-Verstärkern der Rundfunk-Empfänger als Selektionsmittel ausschließlich LC-Filter verwendet. Sie wurden als zweikreisige Bandfilter zwischen zwei Zf-Stufen geschaltet und aus Massekerntspulen sowie kleinen Keramikcondensatoren oder Kunststoff-Foliencondensatoren aufgebaut. Daraus resultiert die Bezeichnung Reaktanz-Filter.

Mit der Verwendung von integrierten Zf-Schaltkreisen entfiel die Möglichkeit der stufenweisen Selektion. Die erforderliche Selektion muß vielmehr vor dem breitbandig verstärkenden Schaltkreis erreicht werden. Für diese Aufgabe Mehrkreis-Reaktanzfilter einzusetzen erwies sich als unzuverlässig. Denn es mußte als Nebenforderung die zunehmende Miniaturisierung im Auge behalten werden. Bei kleinen, sehr gedrängt aufgebauten Filtern sinkt die Güte, dementsprechend steigt die Durchlaßdämpfung und der Rauschabstand wird kleiner.

Um beide Forderungen: hohe Selektion bei hoher Güte und kleine Filterabmessungen erfüllen zu können, griff man nach den elektromechanischen Schwingern. Die kommerzielle Technik hat diesen Weg schon seit langem beschritten und Quarzfilter überall dort eingesetzt, wo bei der engen Besetzung der Frequenzbänder sehr hohe Trennschärfen verlangt wurden [5]. Die Rundfunk-Empfängertechnik dagegen verwendet keramische Filter. Sie haben eine gegenüber Quarz wesentlich höhere Ladungsausbeute – die relative Dielektrizitätskonstante von Quarz liegt bei ca. 5, die der piezokeramischen Materialien zwischen etwa 400 und 2500 – und sie sind mit kleinerem Kostenaufwand herstellbar.

2 Piezokeramik

Maßgebend bei den beiden Bauelementen, Quarz und Piezokeramik, ist der Piezoeffekt. Er besagt: Wird bei bestimmten Materialien durch Einwirken einer äußeren Kraft eine Deformation des Kristallgitters hervorgerufen, so entstehen Ladungen auf den Oberflächen. Ebenso ist die Umkehrung gültig, d. h. werden an solche Materialien Spannungen angelegt, so ändern sich die Abmessungen.

Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Bauelementgruppen ist nun der, daß Quarz, Turmalin, Seignettesalz u. a. den Piezoeffekt schon im Rohzustand zeigen, während bei den piezokeramischen Stoffen innerhalb des Herstellungsprozesses ein besonderer Arbeitsgang, die Polarisierung, notwendig ist, um diese Eigenschaft einzuprägen.

3 Die Ursachen für den Piezoeffekt bei Quarz

Voraussetzung für den Piezoeffekt ist, daß das Kristallgefüge aus positiven und negativen Ionen aufgebaut ist. Das Entstehen einer Ionisierung, eines Ionengitters läßt sich am besten am Beispiel eines Kochsalzkristalls (NaCl) klar machen. Bei Natrium ist die äußere Elektronenschale mit nur einem Elektron besetzt. Bei Chlor befinden sich in der äußeren Schale dagegen sieben Elektronen. Diese Schale wäre aber erst mit acht Elektronen voll besetzt [6]. Demzufolge kann das eine Elektron eines Natriumatoms zu einem

Chloratom springen und dort eine stabile, voll besetzte äußere Elektronenschale schaffen. Das bedeutet aber eine Ionisierung, denn durch diesen Vorgang wird das Na-Atom positiv (Na⁺), das Chloratom negativ (Cl⁻). Bei einem Kochsalzkristall ist jedes Na⁺-Ion von sechs Cl⁻-Ionen umgeben und umgekehrt.

Fallen die Schwerpunkte der positiven und negativen Ladungen zusammen und liegen sie im Kristallzentrum, so entsteht kein elektrisches Feld, das eine Ladung auf den Oberflächen erzeugen könnte. Im anderen Fall, positive und negative Ladungsschwerpunkte fallen nicht zusammen, tritt eine „spontane“ Polarisierung auf. An der Oberfläche ist ein permanentes elektrisches Feld (Turmalin) nachweisbar, falls nicht durch ungenügende Isolation die Oberflächenladungen sich ausgleichen.

Anhand dieser Voraussetzungen macht Bild 1 deutlich, wie bei einem Quarzkristall unter äußerem Druck Ladungen an seinen Oberflächen entstehen können. Das Ionengitter wird

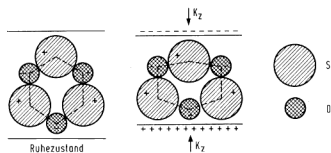


Bild 1. Verzerrung des Ionengitters von einem Quarzkristall durch Einwirken einer äußeren Kraft

gegen den Ruhezustand verzerrt, die positiven Gitterpunkte verschoben sich gegen die negativen, die Ladungsschwerpunkte fallen nicht mehr zusammen.

4 Die Ursachen für den Piezoeffekt bei der Piezokeramik

a) Verwendet werden Oxyde von Blei, Titan, Zirkon (z. B. im Blei-Zirkonat-Titanat), aber auch Kalium-Natrium-Niobat.

b) Die piezokeramischen Materialien sind polykristallin, sie bestehen aus einer Vielzahl kleiner Kristallite, die willkürlich, nach statistischen Gesetzen zueinander orientiert sind.

c) Bei diesen Materialien fallen innerhalb einer Elementarzelle unterhalb einer Grenztemperatur die Ladungsschwerpunkte nicht zusammen. Es entsteht also ein Dipolmoment.

d) Diese elementaren Dipole stellen sich aus energetischen Gründen innerhalb kleiner Bezirke parallel zueinander. Diese Bezirke heißen Domänen oder Weißsche Bezirke. Jede Domäne hat also eine „makroskopische spontane“ Polarisierung (Bild 2).

e) Ein Kristallit hat im allgemeinen mehrere Domänen. Die Lage der Dipole dieser Domänen ist statistisch verteilt. Ihre Dipolmomente kompensieren sich also. Der Kristallit hat kein resultierendes, nach außen wirkendes Dipolmoment.

f) Oberhalb einer bestimmten Temperatur (Curie-Temperatur) lockert sich das Kristallgefüge, die Elementarzellen werden symmetrisch, ihre Ladungsschwerpunkte fallen zusammen.

Will man also diesen Materialien piezoelektrische Eigenschaften geben, dann muß man, wie folgt, verfahren: Das Material wird bis in die Nähe des Curiepunktes erwärmt. Bei der anschließenden Abkühlung wird es einem starken elek-

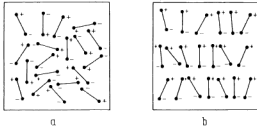


Bild 2. Die Dipolmomente der Domänen in einer Piezokeramik:
a = ungeordnete, statistische Verteilung,
b = nach der Polarisierung, in Vorzugsrichtung aus-
gerichtet

trischen Feld ausgesetzt. Dadurch erreicht man, daß die Dipolmomente der Domänen sich so ausrichten, daß ihre Feldrichtung der des außen angelegten Feldes möglichst nahe kommt. Diese Lage oder Zuordnung wird während des Abkühlungsprozesses „eingefroren“, man spricht von „remanenter Polarisation“. Die so behandelten Materialien erhalten permanente piezoelektrische Eigenschaften.

5 Vorteile und Eigenschaften der Piezokeramik

Sie ist hart, chemisch inaktiv, unempfindlich gegen Feuchtigkeit.

Form und Größe der Bauelemente sind in weiten Grenzen frei wählbar.

Der Elastizitätskoeffizient¹⁾ liegt etwa bei $5 \cdot 10^{-12} \text{ Pa}^{-1}$, die Druckfestigkeit über 500 Pa und die Curie-Temperatur über 250 °C.

Herstellung

Die Ausgangsmaterialien werden in Kugelmöhlen gemahlen und naß gemischt, dann getrocknet. Anschließend wird das entstandene Pulver auf etwa 1000 °C erhitzt, so daß das gewünschte Endmaterial (z. B. Blei-Zirkonat-Titanat) entsteht. Nach erneutem Mahlen wird es mit einem Binder versetzt, gepreßt und bei 1200...1300 °C gesintert. Es folgt die bereits beschriebene Prozedur der Polarisation. Wegen des Schwundes beim Sintern müssen anschließend noch, falls erforderlich, wichtige Abmessungen durch Schleifen auf die verlangten Maße gebracht werden.

6 Die Piezokeramik im Filter

6.1 Grundschwingung und nichtharmonische Oberschwingungen

Bild 3 zeigt das Ersatzschema eines piezoelektrischen Resonators. Darin sind: L_K , C_K , R_K elektrische Ersatzgrößen für

mechanische Eigenschaften des Resonators und zwar L_K für die schwingende Masse, C_K für die Elastizität, R_K für die mechanischen Verluste, die Dämpfung. Ihre Werte können nur auf indirektem Weg elektrisch bestimmt werden. C_0 da-

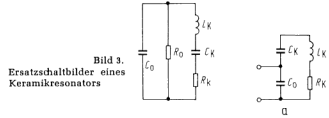


Bild 3. Ersatzschaltbilder eines Keramikresonators

gegen ist eine elektrische Größe, sie stellt die Kapazität des Resonators weit unterhalb der Resonanzfrequenz dar, sie ist durch die Größe der Elektrodenflächen, die Dicke und die Dielektrizitätskonstante des keramischen Elements gegeben. R_0 schließlich ist durch die dielektrischen Verluste bestimmt.

Nach Bild 3 ergeben sich zwei Resonanzfrequenzen:

- a) die Serienresonanz (L_K , C_K in Serie)
- b) eine Parallelresonanz aus C_0 , C_K in Serie mit dazu parallel liegendem L_K (Bild 3a). Sie muß wegen kleinerer Gesamtkapazität bei höherer Frequenz als die Serienresonanz liegen.

Bild 4 zeigt die durch diese beiden Resonanzstellen entstehende Frequenzabhängigkeit.

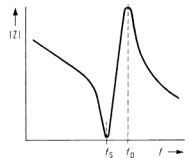


Bild 4. Verlauf des Scheinwiderstandes eines Keramikresonators über der Frequenz; f_s Serienresonanz-Frequenz, f_p Parallelresonanz-Frequenz

Neben diesen beiden Frequenzen tritt noch eine Reihe von Oberschwingungen auf. Sie sind vornehmlich von der Ausführung des Schwingers und der angeregten Schwingungsform (z. B. Dickschwinger, Radialschwinger) abhängig. Dadurch verschleiert sich die Weitauswahl.

Meistens liegen diese Resonanzfrequenzen genügend weit von der Sollresonanz entfernt, so daß sie die Übertragung nicht stören. Andernfalls kann man ihren Einfluß durch Änderung der Elektrodenflächen mindern. Eine weitere, aber aufwendige Lösung besteht darin, Keramikresonatoren mit gleicher Sollfrequenz, aber unterschiedlicher Lage der Nebenresonanz zu kombinieren.

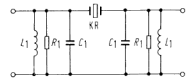


Bild 5. Schema eines dreikreisigen Hybridfilters

Ein anderer, viel begangener Weg führt zu einem Hybridfilter, bei dem Keramikresonatoren mit Reaktanzkreisen zu einer Filterkette kombiniert werden (Bild 5, Dreikreisfilter).

1) Elastizitätskoeffizient oder Dehnungsgröße = $\frac{\text{Dehnung}}{\text{mech. Spannung}} = a$

$$\left(\text{Dehnung} = \frac{\Delta l}{l}, \text{ mech. Spannung} = \frac{\text{Kraft}}{\text{Fläche}} \right)$$

Elastizitätsmodul (Dehnungsmodul, Youngscher Modul) = $1/a$

6.2 Filter für 460 kHz

Dreikreis-Hybridfilter [1]

Bild 6 zeigt ein Schaltungsbeispiel für ein Dreikreis-Hybridfilter. Die damit erzielten Werte sind:

Bandmittenfrequenz ²⁾	460 kHz ± 1 kHz
3 dB Bandbreite	4,5 kHz
Durchlaßdämpfung	13 dB
Selektion/Sperrdämpfung bei 9 kHz	ca. 35 dB
Weitabselektion/Sperrdämpfung bei 50 kHz	ca. 80 dB

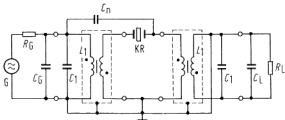


Bild 6. Praktische Schaltung des Dreikreisfilters nach Bild 5

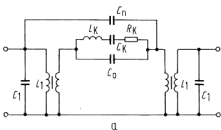


Bild 6a. Für das Schaltzeichen des Keramikresonators von Bild 6 ist seine Ersatzschaltung gezeichnet. Das macht den Zweck der Neutralisierung (Cn) deutlich

Der Kondensator Cn = 8,2 pF dient zur Unterdrückung der Parallelresonanzfrequenz von KR und macht die Durchlaßkurve symmetrisch (Neutralisierung von Cn). Ergänzend zeigt Bild 6a, daß die beiden Reaktanzkreise in Parallelresonanz schwingen, während vom mittleren die Serienresonanz verwendet wird. Deshalb bedeutet Cn eine unerwünschte Kopplung, die neutralisiert werden muß.

Für die LC-Filter werden folgende Werte vorgeschlagen: L1 146 µH, C1 820 pF.

Vierkreis-Hybridfilter [2, 3]

Die Schaltung zeigt Bild 7. Es werden zwei LC-Filter und zwei Keramikresonatoren verwendet. Die Ergebnisse:

Bandmittenfrequenz	460 kHz ± 1 kHz
3 dB Bandbreite	5 kHz ± 0,5 kHz
Durchlaßdämpfung	< 7,5 dB
Selektion bei 9 kHz	> 43 dB
Weitabselektion	> 80 dB

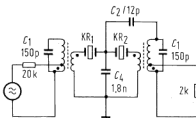


Bild 7. Vierkreis-Hybridfilter

Auch hier wird zur Unterdrückung der Parallelresonanz ein Neutralisationskondensator (C2) eingefügt. Die Kopplung

²⁾ Als Mittenfrequenz wird bei Bandpässen die arithmetische Mitte zwischen den Durchlaßgrenzen – bestimmt meist durch die 3-dB-Durchlaßdämpfung – bezeichnet.

zwischen den beiden Keramikresonatoren wird durch den Kondensator C4 eingestellt. Für die Keramikresonatoren bei 460 kHz gelten folgende Werte (s. Bild 3):

Kreisgüte Q	1000...1200
RK	ca. 20 Ω
Cn + CK	ca. 190 pF
CK	ca. 16 pF
LK	ca. 7,5 mH

Die hierfür verwendeten dünnen Keramikscheiben werden axial polarisiert, sie schwingen demzufolge radial (Vergrößerung/Verkleinerung des Durchmessers). In Scheibenmitte liegt ein Schwingungsknoten, hier kann also, ohne Beeinflussung der Schwingung, die Spannung über zwei vergoldete Druckkontakte zugeführt werden (Bild 8).

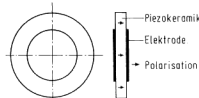


Bild 8. Keramischer Schwingler für ca. 460 kHz in Scheibenform, axial polarisiert

Vorteil dieser Filter:

Sie erfüllen einwandfrei die gestellten Forderungen. Sie sind klein und lassen sich kompakt aufbauen, der Platzbedarf beträgt z. B. 35 × 15 × 15 mm. Sie sind leicht abgleichbar; denn die beiden LC-Kreise sind ohne gegenseitige Beeinflussung abstimbar (lose Kopplung über die KR).

6.3 Filter für 10,7 MHz

Fünfkreis-Hybridfilter [2, 3]

Bild 9 zeigt den prinzipiellen Aufbau. Darnach besteht das Filter aus einem Reaktanz-Einzelkreis und zwei keramischen

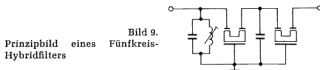


Bild 9. Prinzipbild eines Fünfkreis-Hybridfilters

Doppelschwingern. Jeder Doppelschwinger wirkt wie zwei einzelne, mechanisch gekoppelte Kreise. Bei dieser Frequenz (10,7 MHz) arbeitet man mit Dickenschwingern (Bild 10). Auf

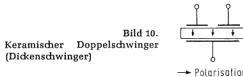


Bild 10. Keramischer Doppelschwinger (Dickenschwinger)

der Eingangsseite des Doppelschwingers wird die elektrische in mechanische Schwingung, auf der Ausgangsseite die mechanische in elektrische Schwingung umgewandelt.

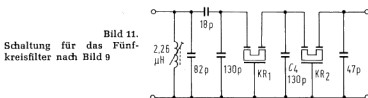


Bild 11. Schaltung für das Fünfkreisfilter nach Bild 9

Die beiden Keramikfilter werden durch den Kondensator $C_4 = 130 \text{ pF}$ miteinander gekoppelt (Bild 11). Die erzielten Werte sind:

Bandmittenfrequenz	10,7 MHz
3 dB Bandbreite	ca. 180 kHz
Durchlaßdämpfung	ca. 10 dB
Selektion bei 300 kHz	ca. 50 dB
Weitabselektion	ca. 60 dB
Kreisgüte des einzelnen Resonators	ca. 200

Keramische Resonatoren sind sehr temperaturstabil. Filter, die mit ihnen aufgebaut sind, sind dadurch gegen Temperaturschwankungen sehr unempfindlich. Man kann etwa mit einer Frequenzablage von $\pm 0,4 \%$ zwischen -10 und $+80 \text{ }^\circ\text{C}$ rechnen.

Man beachte die allgemeine Forderung, jedes Filter am Ein- und Ausgang nur mit seinem charakteristischen Abschlußwiderstand, wie er in den Datenblättern angegeben ist, abzuschließen. Denn nur dann sind die dort genannten technischen Werte zu erreichen.

6.4 Frequenzdiskriminator für 4,5 MHz

Bild 12 zeigt die Schaltung und die Umwandlerkennlinie, verwendet wird ein Keramikfilter WFA - 4,5 MA von Murata.

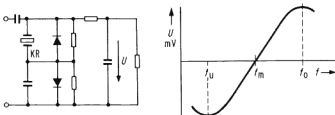


Bild 12. Aufbau eines Diskriminators für 4,5 MHz mit einem Keramikresonator. Rechts: die dazu gehörende Umwandlerkennlinie

Die Ergebnisse:

Mittenfrequenz	4,5 MHz \pm 15 kHz
Abstand f_u bzw. f_u von f_m	\pm 50 kHz
Empfindlichkeit	1,8 mV/kHz

6.5 Verbesserung der Selektion durch einen Keramikresonator in der Emittierleitung

Bild 13 zeigt die Schaltung [7]. Für die Sollfrequenz ist der Resonanzwiderstand des KR klein, die Gegenkopplung über die Widerstandskombination im Emittier also praktisch Null.

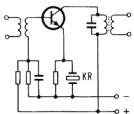
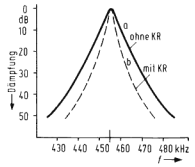


Bild 13. Einbau eines Keramikresonators (für 455 kHz) parallel zum Emittierwiderstand einer ZF-Stufe

Je mehr sich die Frequenz von der Sollfrequenz entfernt, um so stärker steigt die Impedanz des keramischen Filters und damit der Grad der Gegenkopplung. Die Resonanzkurve wird schmaler (Bild 13a).

Bild 13a. Die Selektionskurve eines ZF-Verstärkers: a - ohne Einbau eines Keramikresonators, b - mit Einbau eines Resonators in eine der ZF-Stufen



6.6 Kettenfilter

Sie werden in sehr hochwertigen (kommerziellen) Empfängern benutzt, um Durchlaßkurven mit sehr steilen Flanken oder sehr kleiner Bandbreite zu erhalten.

Beispiel: Vollkeramische Filter, Murata CFS 455 C, Mittenfrequenz 455 kHz, Aufbauschema Bild 14. Der Verlauf der Durchlaßkurve ist durch folgende Angaben bestimmt:

Mittenfrequenz	455 kHz
3 dB Bandbreite	\pm 9 kHz
6 dB Bandbreite	\pm 13 kHz
70 dB Bandbreite	\pm 23 kHz

Die Durchlaßdämpfung dieses Filters beträgt 6 dB.

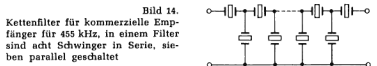


Bild 14. Kettenfilter für kommerzielle Empfänger für 455 kHz, in einem Filter sind acht Schwingler in Serie, sieben parallel geschaltet

In diesem Zusammenhang ist es interessant, auf gleichartige Entwicklungen in der Quarztechnik hinzuweisen. Dies sind die monolithischen Quarzfilter in miniaturisierter Bauform. Hier befinden sich mehrere akustisch miteinander gekoppelte Resonatoren auf einer Quarzscheibe. Es werden also nicht einzelne Quarzresonatoren mit zusätzlichen elektrischen Bauelementen zu einer Filterschaltung kombiniert. Die schmale Bandbreite und die hohe Flankensteilheit erkennt man an folgenden Werten:

Beispiel: Monolithisches Quarzfilter MQF 10,7-15 [9]

Mittenfrequenz	10,7 MHz
3 dB Bandbreite	\pm 8 kHz
6 dB Bandbreite	\pm 15 kHz
70 dB Bandbreite	\pm 20 kHz

Die Durchlaßdämpfung ist kleiner als 2,5 dB, das Gewicht beträgt etwa 4 g.

Literatur

- [1] Koch, J.: Piezoxide - Wandler, Grundlagen, Anwendungen, Schaltungen. Valvo GmbH, Hamburg.
- [2] Schumacher, H.: Piezokeramische Hybridfilter für den AM- und FM-Rundfunk. Stemag-Nachrichten, H. 43, April 1970.
- [3] Crantz, D.: Bajazzo universal 201. Telefunken-Sprecher, H. 55, 1971.
- [4] Spescho, Dr. G. und Volle, E.: Piezoelektrische Meßgeräte. Sonderdruck Kistler Instrumente GmbH, Nellingen b. Stuttgart.
- [5] ELEKTRONIK-Arbeitsblätter, Bd. 6, Fi 81.
- [6] ELEKTRONIK-Arbeitsblätter, Bd. 4, Ph 01
- [7] Murata MFG Co., Ltd.: Cat. 961 E.
- [8] FUNKSCHAU 1972, Heft 20, S. 740.
- [9] Telefunken Informationsblatt IB 7142, Monolithische Quarzfilter MQF 10,7-15 und MQF 15,3-15.