

Symmetrische Quarzabzweigfilter für SSB- und AM-Bandbreiten

ULRICH GRAF – DK4SX

Quarzabzweigfilter – gern zur ZF-Selektion in Eigenbaugeräten verwendet – kommen meist nur für CW zum Einsatz. Ihre Dimensionierung für größere Bandbreiten musste nämlich bisher mit einer unsymmetrischen Durchlasskurve erkauf werden. Der Autor hat ein Verfahren zum Entwurf symmetrischer breitbandiger Abzweigfilter für AM und SSB entwickelt und zeigt, wie derartige Filter mithilfe des FA-NWT dimensioniert werden können.

Quarzabzweigfilter, meist als Ladderfilter bezeichnet, sind bei Selbstbauern sehr beliebt und weit verbreitet. Sie ermöglichen die Konstruktion schmalbandiger Filter mit einfach dimensionierbarer Bandbreite ohne hohen Aufwand. Allerdings sind bislang in der Literatur und in den Bauanleitungen zu praktischen Realisierungen überwiegend schmalbandige Filter für Telegrafie vorgestellt worden. Filter größerer Bandbreite, z. B. für SSB- oder gar AM-Betrieb, waren weniger attraktiv für den Anwender, da sie bei steigender Bandbreite zunehmend unsymmetrisch wurden mit einer flacher werdenden unteren Filterflanke. Dies hat mit der unvermeidlichen Gehäuse- und Streukapazität der Quarze zu tun.

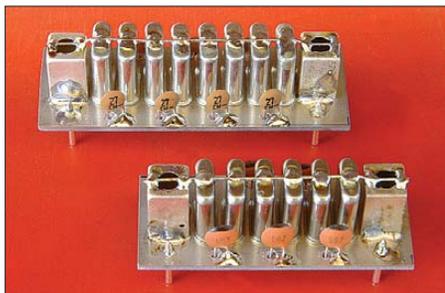


Bild 1: Einbaufertige Quarzfilter in symmetrischer Bauweise; an den Ein- und Ausgängen sind die Abschirmbecher der Kompensationspulen zu erkennen.

In diversen Studien sind bereits Ideen vorgestellt worden, wie diesem Mangel abzuwehren ist. Es erstaunt jedoch, dass diese Anregungen wenig Resonanz gefunden zu haben scheinen, denn selbst in modernen SSB-Bausatzgeräten ist meist ein zu schmales, unsymmetrisches Filter zu finden, das zu einer nicht optimal verständlichen Modulation führt. Ich habe die Ideen zur Behebung der Unsymmetrie aufgegriffen, modifiziert und diverse Filter mit sowohl symmetrischen Filterflanken als auch größerer Bandbreite entworfen und gebaut.

Trotz der vergleichsweise wenig komplizierten Mathematik zum Entwurf von Abzweigfiltern und zwischenzeitlich verfügbarer Entwurfssoftware für den PC erscheint der Aufwand zur präzisen Messung der not-

wendigen Quarzparameter für viele Funkamateure als schwer überwindbare Hürde, da zuerst die Messeinrichtungen gebaut werden müssen [1]. Nach der Berechnung bedarf das gewünschte Filter dann oft noch zusätzlicher Nachsimulation oder weiterer messtechnisch unterstützter Optimierung.

Mit dem FA-Netzwerktester ist jetzt zumindest die notwendige Messausrüstung für jeden leicht zugänglich und erschwinglich geworden. Der praktische, empirische Entwurf und die anschließende Optimierung durch Messung können nun in einem Arbeitsgang erfolgen. So gelangt man, sofern einige Vorentwürfe zur Verfügung stehen, in recht kurzer Zeit und ohne Rechenerei zu einem brauchbaren Filterdesign. Diese Filter entsprechen zwar nicht unbedingt einem nach Filtertheorie präzise errechneten Modell mit vorgegebener Welligkeit und Flankensteilheit – die erzielbaren sehr guten Anpasswerte und die praktisch erprobte Anwendung garantieren jedoch die einwandfreie Funktionalität des Verfahrens und der Filterresultate.

Zur Rekapitulation zeigt Bild 3 das Ersatzschaltbild eines Quarzes und dessen wesentliche Bestandteile: Die Serieninduktivität L_s mit sehr hoher Güte, die extrem kleine Se-

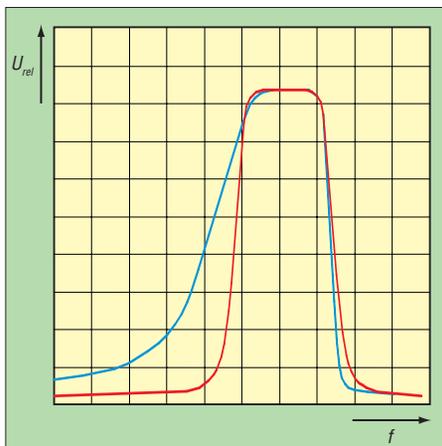


Bild 2: Unterschied zwischen einem symmetrischen Quarzabzweigfilter (rot) und einem Standardabzweigfilter (blau), beide für SSB-Bandbreite ausgelegt; das Standarddesign zeigt eine flacher verlaufende untere Filterflanke.

rienkapazität C_s , der Verlustwiderstand R_v und die parallel zu allen Elementen liegende Gehäuse- und Streukapazität C_0 . Zeichnet man beispielsweise ein dreipoliges Quarzabzweigfilter, wie in Bild 4 dargestellt, also ein Filter bestehend aus drei Quarzen und zwei Koppelkapazitäten gegen Masse, mit dieser Ersatzschaltung um, dann sieht die Schaltung wie in Bild 5 aus – diesmal dargestellt ohne Verlustwiderstände.

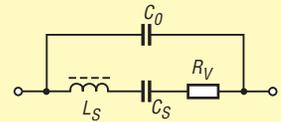


Bild 3: Das Ersatzschaltbild eines Quarzes besteht aus der Serieninduktivität L_s , der Serienkapazität C_s , dem Verlustwiderstand R_v und der Gehäusekapazität C_0 .

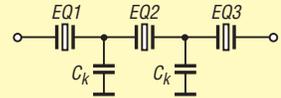


Bild 4: Schaltung eines dreipoligen Quarzabzweigfilters, bestehend aus den Quarzen Q1 bis Q3 und den Koppelkapazitäten C_k .

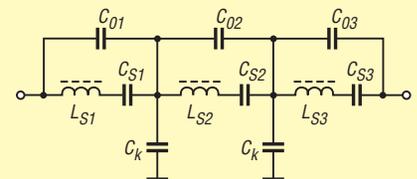


Bild 5: Schaltung des Filters nach Bild 4 mit Darstellung der Quarze in ihrer Ersatzschaltung; die Verlustwiderstände wurden weggelassen.

Die unvermeidlichen Kapazitäten C_0 wirken – vereinfacht ausgedrückt – mit der jeweiligen Serieninduktivität nun wie Polstellen, vergleichbar z. B. mit jenen verstellerten Tiefpässen. Dort bilden Parallelkondensatoren zu den Spulen Polstellen im Sperrbereich. Hier versteilern diese Polstellen die höherfrequente Filterflanke des Abzweigfilters, während die untere flacher wird.

Je größer die Bandbreite, d. h. je kleiner die Koppelkondensatoren C_k , desto ausgeprägter ist dieses Verhalten. Das war bisher der Grund, den Bau von Filtern für das obere Seitenband zu meiden, da wegen der Unsymmetrie die anteilige Unterdrückung des Trägers und die des unteren Seitenbands mangelhaft ausfielen. Bild 2 veranschaulicht den Unterschied, Bild 6 zeigt den Effekt deutlich an den gemessenen Durchlasskurven eines vierpoligen AM-Filters in der bisherigen unsymmetrischen Bauweise und in symmetrischer Ausführung.

Wes Hayward, W7ZOI, hat z. B. in [2] und Pat Hawker, G3VA, in [3] den theoretischen Hintergrund dieses Sachverhalts ausführ-

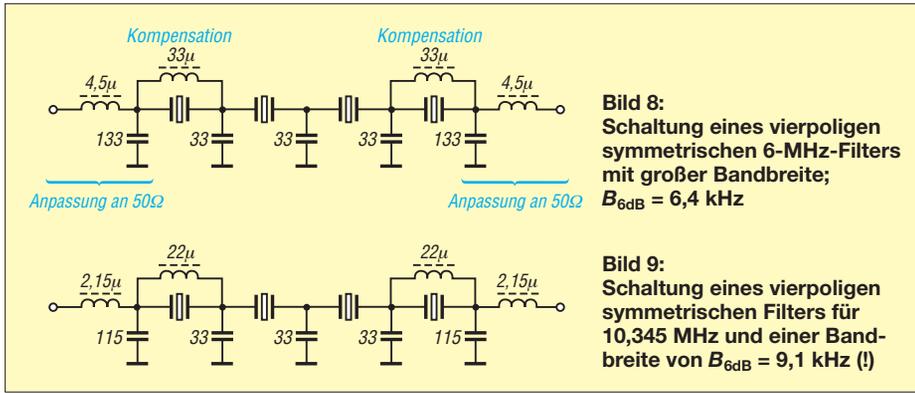


Bild 8: Schaltung eines vierpoligen symmetrischen 6-MHz-Filters mit großer Bandbreite; $B_{6dB} = 6,4$ kHz

Bild 9: Schaltung eines vierpoligen symmetrischen Filters für 10,345 MHz und einer Bandbreite von $B_{6dB} = 9,1$ kHz (!)

det werden. Hier dient die L/C-Transformation exemplarisch vor allem dazu, die Aufbaufilter einfach, schnell und präzise im 50-Ω-System vermessen zu können. Zu berücksichtigen ist dabei allerdings, dass die empirisch gefundene L/C-Anpassung auch bereits die Blindanteile enthält, die an der Schnittstelle zum Filter anteilig dem Filter zuzuordnen sind. Diese sind z. B. bei transformatorischer Anpassung zusätzlich zu ermitteln und anzufügen.

Die durch den Herstellprozess von Quarzen gleicher Frequenz vorhandenen unterschiedlichen Eigenschaften und ihre kundenspezifischen Daten können die angegebenen Werte der Bandbreite und vor allem der Anpassung abweichen lassen. Ein Nachbau bedarf demnach immer der Überprüfung der Filtereigenschaften und der Anpassung mit dem Netzwerktester. Solche

Abweichungen lassen sich gut an den Bandbreiten der breiten Filter in Tabelle 1 im Vergleich zu den vierpoligen Filtern nach den Bildern 8 und 9 ausmachen.

In Bild 14 ist die typische Durchlasskurve breitbandiger, symmetrischer vierpoliger Abzweigfilter gemäß der Schaltungen in den Bildern 8 und 9 zu sehen. Man erkennt die exakte Symmetrie bis zu hohen Dämpfungswerten. Die Welligkeit lässt sich leicht auf geringste Werte trimmen. Ein solches Filter wäre beispielsweise gut als Roofing-Filter in einem Empfänger mit niedriger erster ZF einsetzbar.

Die Bilder 15 bis 17 zeigen die Durchlasskurven der sechspoligen Abzweigfilter. Selbst bei relativ tiefen Frequenzen lassen sich noch nahezu perfekte SSB-Filter unterschiedlicher Bandbreite realisieren. Schließlich sind in Bild 18 die Durchlass-

kurven zweier 10,7-MHz-Filter mit jeweils acht Quarzen zu sehen. Alle Bandbreiten sind als 6-dB-Bandbreiten angegeben.

Die Versuchsmuster in Bild 21 tragen die Spulen zur Kompensation und Impedanzanpassung freitragend; die Induktivitäten zur Anpassung sind abgleichbar, diejenigen zur Kompensation ungeschirmt Festinduktivitäten. Letztere – und der frei tragende Aufbau ohne Masseverbindung der Quarzgehäuse und der Spulenbecher – schränken die Weitabselektion der Versuchsaufbauten deutlich ein. In einem endgültigen Aufbau sollten daher Kompensationsspulen geschirmt sowie Schirmbecher und Quarzgehäuse auf Masse gelegt werden. Bild 1 zeigt den praktischen Aufbau einbaufertiger Filter. Hier sind die Kompensationsspulen parallel zum ersten und letzten Quarz in den Spulenbechern untergebracht.

Die Anpassung/Reflexionsdämpfung der Filter richtet sich nach der Welligkeit im Durchlassbereich; sie beeinflusst dabei die Flankensteilheit. Generell kann sie, vergleichbar mit kommerziellen Filtern, 10 dB bis 15 dB, aber auch noch bessere Werte erreichen. Die Durchlassdämpfung der aufgebauten Exemplare kann den Wobeldiagrammen entnommen werden. Abhängig von der Güte der Quarze und der Bandbreite liegt auch sie in üblicher Größenordnung. Sie beträgt beispielsweise für ein sechspoliges Filter zwischen etwa 10 dB (schmales CW-Filter) und 1,5 dB (AM-Filter).

Bei der Dimensionierung von Filtern unterschiedlicher Bandbreite ist folgender genereller Nachteil zu berücksichtigen: Je breiter die Filter sind, desto geringer ist die kapazitive Quarzbelastung durch die dann kleiner zu dimensionierenden Koppelkondensatoren. Umgekehrt verhält es sich bei sehr schmalbandigen Filtern. Bild 20 zeigt, dass die Quarzbelastung nur ein Viertel der Größe der Koppelkondensato-

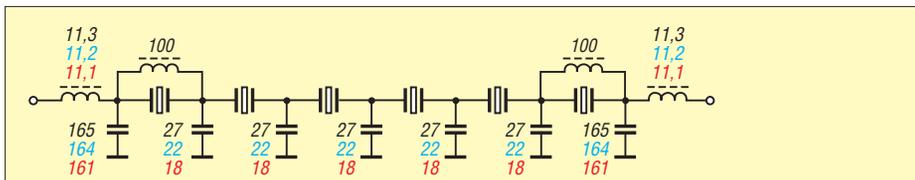


Bild 10: Schaltung sechspoliger symmetrischer Abzweigfilter für 4 MHz unterschiedlicher Bandbreiten; Welligkeit < 1 dB, $B_{6dB} = 1,9$ kHz, $B_{6dB} = 2,2$ kHz (Werte in Blau), $B_{6dB} = 2,6$ kHz (Werte in Rot)

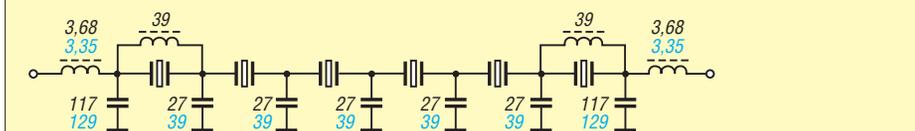


Bild 11: Schaltung sechspoliger symmetrischer Abzweigfilter für 8 MHz; Welligkeit < 2 dB, $B_{6dB} = 4,4$ kHz, $SF = 2,04$; $B_{6dB} = 3,17$ kHz (Werte in Blau)

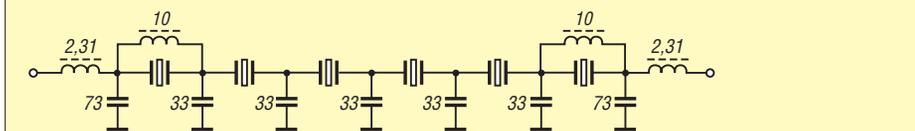


Bild 12: Schaltung eines sechspoligen symmetrischen Abzweigfilters für 12 MHz; Welligkeit < 2 dB (unselektierte Quarze), $B_{6dB} = 8,15$ kHz

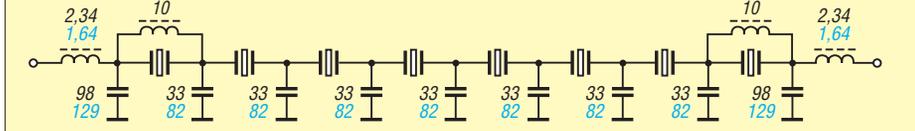


Bild 13: Schaltung achtpoliger symmetrischer 10,7-MHz-Abzweigfilter, $f_m = 10,7$ MHz, $B_{6dB} = 6,0$ kHz, $SF = 2,04$; $B_{6dB} = 2,8$ kHz, $SF = 1,5$ (Werte in Blau)

Tabelle 2:
Impedanz Z und Mittenfrequenz-Offset f_{offs} von 10,7-MHz-Quarzfiltern in Abhängigkeit von den Koppelkapazitäten C_k

C_k [pF]	B [kHz]	Z [Ω pF]	f_{offs} [Hz]
120	2,0	155 60	0
100	2,4	169 52	+200
86	2,7	171 28	+320
82	2,9	198 17	+450
68	3,4	190 7	+740
47	4,6	295 9	+1150
33	5,9	406 2	+1900
27	6,3	447 1,7	+2250

Alle Beispiele sind sechspolige Abzweigfilter mit einer Reflexionsdämpfung ≥ 10 dB. Die Filterimpedanz wurde über eine Schaltungssimulation errechnet. Das Filter mit der Bandbreite 2,0 kHz hat keinen Mittenfrequenz-Offset, da die Quarze eine korrekte Nennbelastung von 30 pF sehen. Alle Quarze stammen aus einer Quarzcharge.

ren beträgt. Bei solchermaßen geringerer/ größerer kapazitiver Belastung als der Nennbelastung werden die Quarze in breiten Filtern in der Frequenz nach oben und bei schmaleren nach unten gezogen. Filter aus derselben Charge von Quarzen weisen daher mit steigender Bandbreite

immer höhere Mittenfrequenzen auf und solche mit geringen Bandbreiten wandern mit ihrer Mittenfrequenz unter die Nennfrequenz der Quarze; siehe auch Bilder 18 und 19 und Tabelle 2. Dabei kann die Abweichung zur Quarznennfrequenz immerhin bis zu ± 2 kHz betragen, selbstverständ-

Formfaktor

Der Formfaktor (engl.: *shape factor*, daher *SF*) eines Filters ist das Verhältnis der Durchlassbandbreite bei 60 dB Dämpfung (60-dB-Bandbreite, B_{60dB}) zu der bei 6 dB (6-dB-Bandbreite, B_{6dB}).

$$SF = \frac{B_{60dB}}{B_{6dB}}$$

Der Formfaktor ist stets größer als 1. Je näher er bei 1 liegt, umso stärker nähert sich die Durchlasskurve einem Rechteck an.

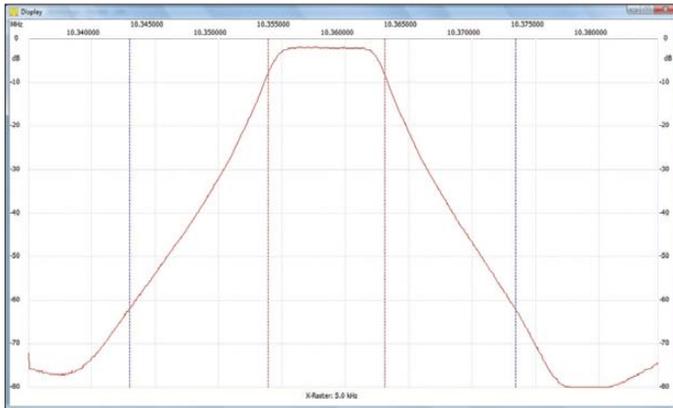


Bild 14: Typische Durchlasskurve eines symmetrischen vierpoligen Abzweigfilters großer Bandbreite, wie in den Schaltungen in den Bildern 8 und 9

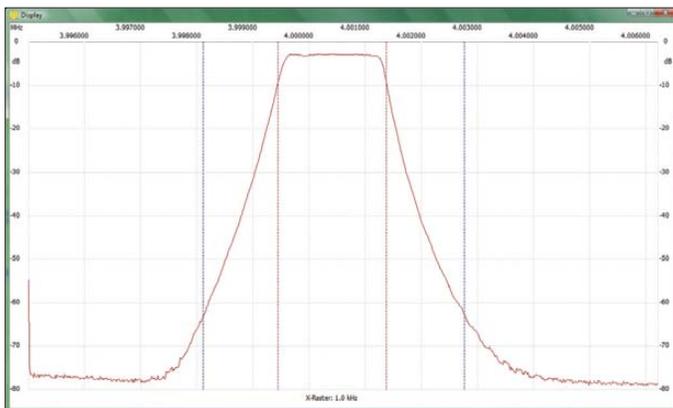


Bild 15: Durchlasskurve eines sechspoligen symmetrischen SSB-Filters bei $f_m = 4$ MHz nach den Bildern 10 bis 12; der Verlauf ist typisch für alle drei Bandbreiten. Formfaktor $SF \approx 2,4$



Bild 16: Durchlasskurve eines sechspoligen Filters bei $f_m = 8$ MHz; der Verlauf ist typisch für beide Bandbreiten.



Bild 17: Durchlasskurve des sechspoligen Filters bei $f_m = 12$ MHz; dieses Filter wurde aus unselektierten Quarzen zusammengestellt. Die Kompensationsspulen sind noch geringfügig zu groß.

lich dabei immer abhängig von den Eigenschaften der Quarze.

Abzweigfilter sind leicht induktiv; d. h. sie benötigen zur Kompensation eine zusätzlich anzuschließende Kapazität für eine reelle Anschlussimpedanz. Bei einer errechneten L/C-Anpassung muss daher die Parallelkapazität am Filter um den entsprechenden Betrag erhöht werden, die empirisch gefundene Anpassung beinhaltet diesen kapazitiven Beitrag bereits.

Der Versatz der Filtermittenfrequenz spielt in einem SSB-Sender oder -Empfänger mit jeweils nur einem Filter keine entscheidende Rolle. So entstandene „krumme“ ZF-Frequenzen lassen sich heutzutage in einem Prozessor, z. B. zur Steuerung eines DDS-Oszillators, für eine stimmige Frequenzanzeige bequem verrechnen. Wer jedoch ein Filter mit präzise vorgegebener Mittenfrequenz oder mehrere Filter unterschiedlicher Bandbreite, jedoch identischer Mittenfrequenz benötigt, ist gezwungen, beim Design eine andere Vorgehensweise zu erwägen.

Mittels frequenzselektierter vorhandener Quarze vom Flohmarkt, deren Mittenfrequenz in der Nähe der Sollfrequenz des gewünschten Filters liegt, ist zuerst ein Entwurfsfilter mit der gewünschten Bandbreite aufzubauen. Dann ist dessen Mittenfrequenz präzise auszumessen. Anschließend wird die Differenz von Mitten- und Nennfrequenz der Quarze ermittelt. Um diese Differenz müssen die Quarzfrequenzen für das gewünschte Filter oberhalb (schmale CW-Filter) oder unterhalb (breite SSB-Filter) der gewünschten endgültigen Filtermittenfrequenz liegen.

Nun kann man sich Quarze für diese Frequenz von einem preiswerten Lieferanten herstellen lassen. Dabei muss jedoch sichergestellt sein, dass diese möglichst geringe Toleranzen aufweisen und mit denselben Daten, außer selbstverständlich der Frequenz, wie die Quarze des Entwurfsfilters hergestellt werden (Muster mitschicken). Auf diese Weise habe ich verschiedene Filter für Projekte aufgebaut, deren Mittenfrequenzen bereits vorher festlagen. Bei der endgültigen Mittenfrequenzlage sollte man aber nicht zu kleinlich sein; auch professionell hergestellte Filter zei-



Bild 18: Durchlasskurven der achtpoligen Filter nach Bild 13; die Welligkeit im Durchlassbereich der schmalbandigen Version ist etwas größer, dafür beträgt der Formfaktor nur $SF = 1,8$. Beide Filter wurden aus unselektierten Quarzen zusammengestellt.



Bild 19: Durchlasskurven eines AM-, SSB- und CW-Filters gleicher Polzahl aus Quarzen gleicher Nennfrequenz; zu erkennen ist die Verschiebung der Mittenfrequenz mit der Bandbreite bei Verwendung unselektierter Quarze.

gen je nach Bandbreite Ablagen der Mittenfrequenz von bis zu 200 Hz.

Filter mit weiteren Mittenfrequenzen richten sich nach den verfügbaren Quarzen und nach dem jeweiligen Gerätekonzept. Zur Realisierung eines Filters kann man sich eines der hier vorgeschlagenen Entwürfe bedienen und diesen mittels NWT umgestalten. Wenn die richtige Bandbreite gefunden ist, wird das Filter durch Feindimensionierung der Anpassung an 50Ω am Messplatz überprüft. Die Größe der Kompensationspulen richtet sich dabei nur nach einer symmetrischen Durchlasskurve.

Im Entwurfsstadium findet man schnell den passenden Normwert. Sie verschieben die Anpassung des Filters geringfügig. Daher muss die Anpassung immer abschließend

optimiert werden. Das geht selbstverständlich mit Kapazitätstrimmern und Abgleichspulen am besten. Zum Schluss wird die Anpassung an das Impedanzniveau der end-

2. Niedrige Anschlussimpedanzen verlangen eine kleinere Induktivität und größere Kapazität zur Anpassung an 50Ω ; breite Filter mit höherer Impedanz benötigen ein vergleichsweise große Induktivität und eine kleine Kapazität zur Impedanztransformation.
3. Zur Änderung der Bandbreite eines Abzweigfilters sind lediglich die Koppelkapazitäten zu ändern. Um ein passables Ergebnis für die Filtercharakteristik zu erzielen, ist anschließend der Anpassung entsprechend große Aufmerksamkeit zu schenken und nur noch diese zu optimieren.
4. Durch Änderung der Anpasstransformation kann die Welligkeit im Durchlassbereich beeinflusst werden. Höhere Welligkeit bedeutet schlechtere Anpassung, aber auch etwas steilere Filterflanken (kleinerer Formfaktor).
5. Nach Filtertheorie errechnete Abzweigfilter weisen zur Erzielung definierter Welligkeiten unterschiedliche Koppelkapazitäten auf. Ihre empirische Optimierung (bei breiten Filtern in Bruchteilen von Pikofarad!) ist nicht zu empfehlen, da die Änderung der Koppelkondensatoren immer eine Änderung der Anschlussimpedanz zur Folge hat. Dadurch erhöht sich die Zahl der zu optimierenden Parameter, die man dann im Versuch nicht mehr im Griff hat.

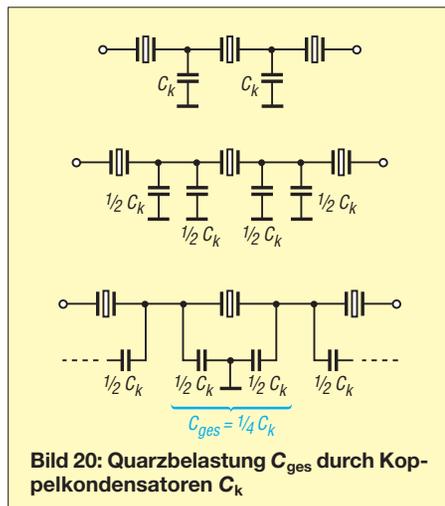


Bild 20: Quarzbelastung C_{ges} durch Koppelkondensatoren C_k

Bild 21: Ansicht einiger der zahlreichen praktischen Versuchsaufbauten zur Messung am FA-NWT; durch die fehlende Schirmung und Massekontaktierung der Quarze ist die Weitabselektion der Versuchsaufbauten begrenzt.

Fotos und Screenshots: DK4SX



gültigen Schaltung umgebaut. Diese Vorgehensweise ist nicht kompliziert und man gelangt mit etwas Geduld zu einem einwandfrei funktionierenden, individuellen Filter. Zur Vereinfachung der Vorgehensweise bei empirischer Filteroptimierung hier noch einige Faustregeln:

1. Filter mit geringen Bandbreiten werden mit großen Koppelkapazitäten und damit niedrigen Querimpedanzen gebaut. Sie besitzen daher generell eine niedrige Anschlussimpedanz. Breitbandige Filter haben Koppelkapazitäten mit kleinen Werten und damit eine höhere Anschlussimpedanz, siehe auch Tabelle 2.

Mit der Anwendung dieser Entwurfs- und Schaltungsmethode sollten zu schmale und unsymmetrische Abzweigfilter für den SSB- und AM-Betrieb endlich der Vergangenheit angehören. dk4sx@dark.de

Literatur

- [1] Mergner, R.-D., DJ9FG: Quarzabzweigfilter für den Amateurgebrauch. Funktelegramm 7 (1995) H. 3, S. 10–17
- [2] Hayward, W.: Refinements in Crystal Ladder Filter Design. QEX 16 (1995) H. 6, S. 16–21
- [3] Hawker, P.: Crystal & Ceramic Filter Miscellany. RadCom 75 (1999) H. 11, S. 60–62
- [4] Graf, U., DK4SX: Messungen an Vierpolen mit von 50Ω abweichenden Anschlussimpedanzen. FUNKAMATEUR 58 (2009) H. 4, S. 414–417