

Wir bauen einen Tiefpaß

Helmut Stadelmeyer, OE5GPL

Was man dazu braucht und was es zu beachten gilt, ist nachstehend beschrieben. Als Helfer für den Entwurf dient ein kostenfreies Programm.

Die Überschrift stimmt übrigens nicht ganz genau – mit dem hier gezeigten Rezept lassen sich genauso gut Hochpässe, Bandpässe oder Kerbfilter für beliebige Frequenzen berechnen und bauen.

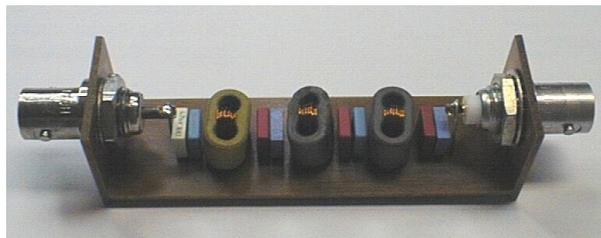


Abb. 1: Fertiger Tiefpaß

Zur Messung der Großsignalfestigkeit einer Aktivantenne bei 100 kHz war ein Tiefpaß notwendig, denn die erste Oberwelle des Meßsenders auf 200 kHz muß dazu gegenüber dem Träger um wenigstens 90 dB unterdrückt werden. Ohne Filter liegt die erste Oberwelle ungefähr 35 dB unter dem Wert des Trägers. Der Tiefpaß soll also bei 200 kHz eine Verbesserung um 55 dB bringen. Damit liegen bereits seine Eckdaten fest.

Der erste Schritt ist die Rechenarbeit. Zum Glück hat jeder, der sich ernsthaft mit der Elektronik oder dem Amateurfunk beschäftigt, einen Computer zur Verfügung, der uns dabei großartig unterstützt. Programme zur Berechnung von Filtern gibt es viele und ein jeder schwört auf jenes, das er kennt und mit dem er am besten umgehen kann. Hier wird beispielhaft das Programm „Filter Design“ von [1] verwendet, um die Bauteilwerte zu bestimmen und anschließend das Filter mit den Werten der tatsächlich vorhandenen Bauteilen zu simulieren.

Das Programm ist kostenfrei, zwar in englischer Sprache, aber es bietet eine sehr ausführliche Hilfe. Funkamateure sind der englischen Sprache zumindest teilweise mächtig, die Bedienung wird deshalb keine allzu großen Schwierigkeiten mit sich bringen. Bildschirmkopien zeigen nachstehend die Vorgangsweise bei der Berechnung.

Wir beginnen bei DESIGN, wählen als Filtertyp „Chebyshev“ und LOW-PASS. Die Werte in der Tabelle ändern wir wie folgt (dabei die Schreibweise genau beachten!):

F1 (die 3-dB-Grenzfrequenz)	120,K (kHz)	Order (Anzahl der Bauteile)	(bleibt frei!)
F2	200,K	Zin (Eingangsimpedanz)	50 (Ohm)
Apass (max. Dämpfung im Passband)	1 (dB)	Zout (Ausgangsimpedanz)	50
Astop (Dämpfung im Stopband)	55,		

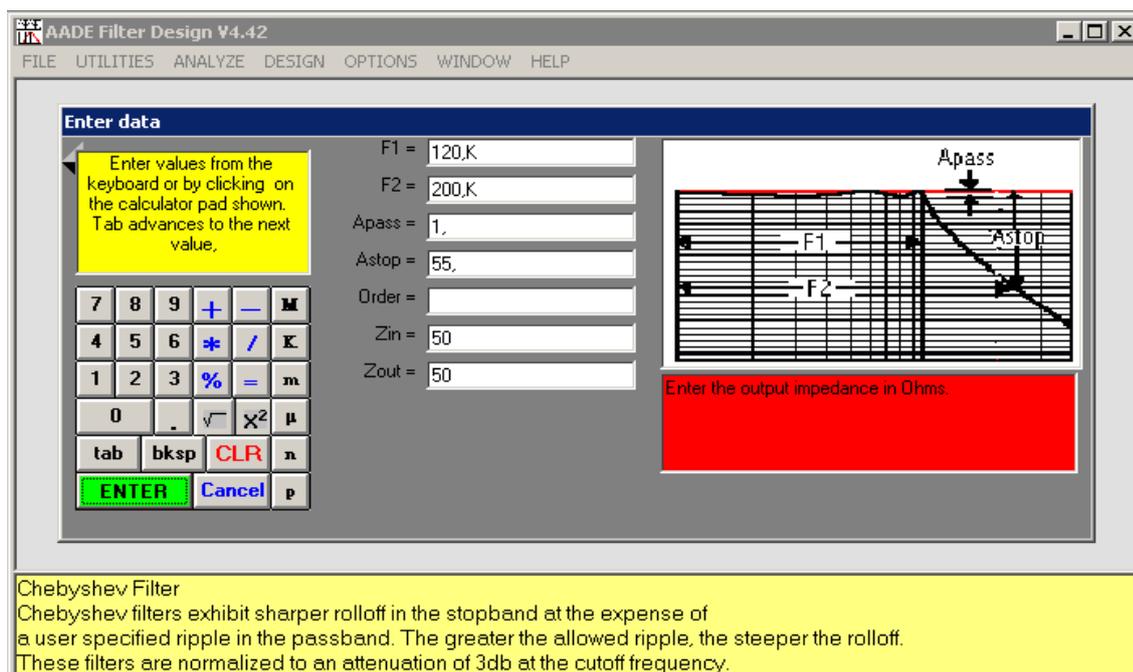


Abb. 2: Eingabemaske DESIGN

Tiefpaß

Nach Bestätigung mit ENTER wird die Güte der Induktivitäten abgefragt, mit der das Programm rechnen soll. Gibt man hier nichts ein, dann werden verlustlose Spulen angenommen. Das entspricht nicht den wahren Verhältnissen, weil jede Spule mehr oder weniger verlustbehaftet ist. Im Beispiel wurde der Wert 100 vorgegeben. Ebenfalls kommt eine Abfrage für einen Text, der auf allen Bildern als Fußzeile erscheint.

Wie ermittelt man die Güte einer Spule? Mit dem Netzwerktester ist das näherungsweise leicht erledigt: Man ergänzt die Induktivität mit einem guten Folienkondensator zu einem Schwingkreis, der etwa auf der Grenzfrequenz des Filters schwingt, schaltet ihn mit kurzen Stücken Koaxialkabel zwischen Generatorausgang und Detektoreingang und liest die invertierte Güte bei der Parallelresonanz ab – das war's auch schon. Weil die Güte des Kondensators besser ist als die der Spule, wird die Güte der Spule angezeigt. Auf die mit unterschiedlichen Induktivitäten gemachten Erfahrungen wird weiter unten genauer eingegangen. Wer mit dem Netzwerktester noch nicht so vertraut ist, sollte sich das Büchlein [2] anschaffen.

Jetzt erscheint das Schaltbild des Filters (Abb. 3) mit den errechneten Bauteilwerten, wobei die Bauteile als „Dipole“ bezeichnet werden. Ein- und Ausgangsimpedanz und gerade Leitungsstücke zur Verbindung von Dipolen zählen ebenfalls zu den Dipolen.

Das Programm hat aufgrund der Angaben herausgefunden, daß die gewünschte Dämpfung mit weniger als 7 Polen nicht zu erreichen ist. Die errechneten Werte für L und C sind in diesem Fall zum Glück so, daß sie sich mit wenig Aufwand beschaffen bzw. anfertigen lassen. Für C2 wird man 47 nF und 10 nF parallel schalten, 82 nF ist gar ein Standardwert. Etwas schwieriger wird es bei den Induktivitäten, hier hilft nur Probieren und Messen. Mit dem L/C-Meßgerät ist man da fein herausen.

Es ist ratsam, diesen Entwurf als Referenz für spätere Vergleiche umgehend zu speichern, denn wir wollen ja auch wissen, ob sich das Filter mit den tatsächlich verwendeten Bauteilen ebenso verhält. In der dritten Zeile des fettgedruckten Textes ist die errechnete Dämpfung bei 200 kHz mit 54,908 dB angegeben – man ist mit einem siebenpoligen Filter genau an der Grenze des Machbaren. Einige Reserve hätte man mit einem neunpoligen Entwurf, aber auch der Materialaufwand wäre größer. Wer will, kann das übungshalber gerne nachrechnen.

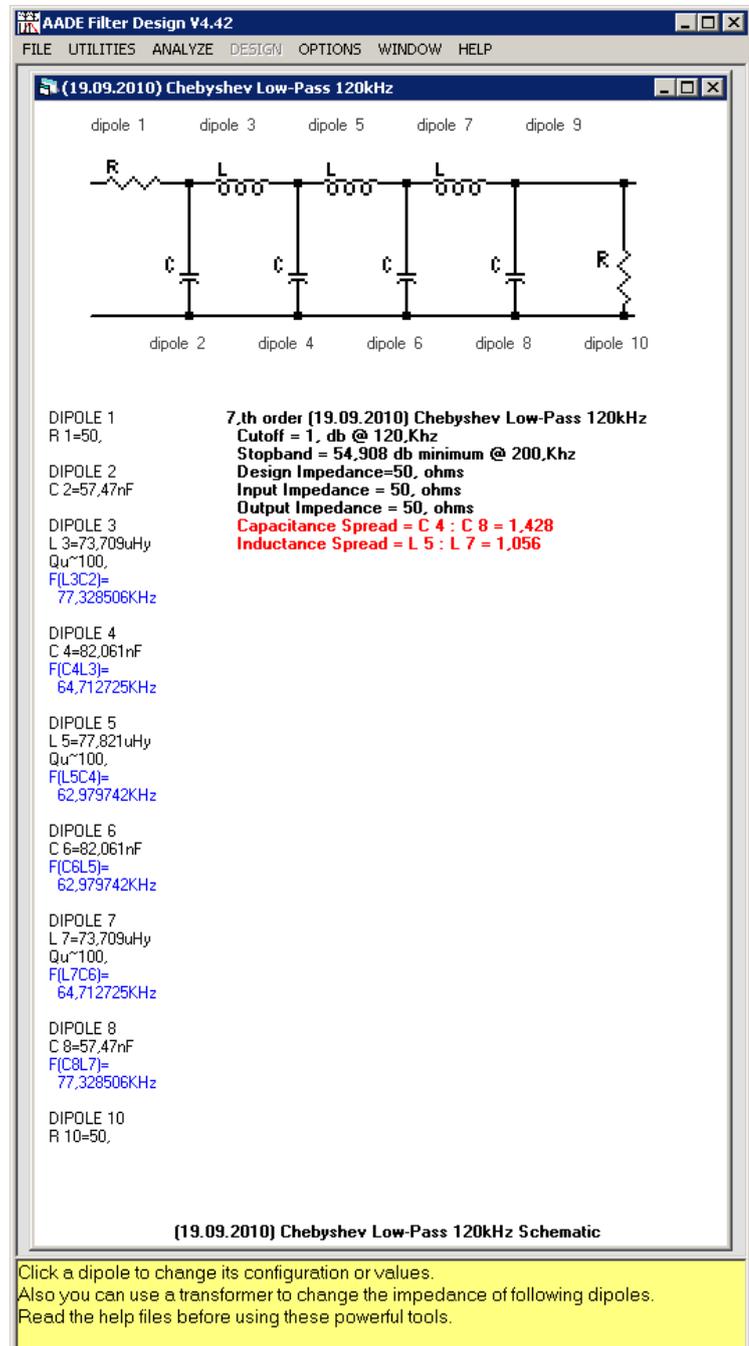


Abb. 3: Ausgabemaske für das gewünschte Filter

Tiefpaß

Klickt man nun im Hauptfenster des Programms oben auf ANALYZE und „Power Effective Gain“, dann kommt die Aufforderung, die Daten zum Zeichnen des Diagramms einzugeben. Dabei bedeuten die in den vier Feldern gemachten Eingaben:

Freq1 (Startfrequenz)	12,K	db1 (obere Grenze der dB-Skala)	0,
Freq2 (Endfrequenz)	300,K	db2 (untere Grenze der dB-Skala)	-80,

Es ist ratsam, vor dem Verlassen der Maske das Feld „Set as Defaults“ anzuklicken, denn man wird dieses Diagramm sicher mehr als einmal anschauen wollen.

Enter data

Enter values from the keyboard or by clicking on the calculator pad shown. Tab advances to the next value.

7 8 9 + - M
4 5 6 * / K
1 2 3 % = m
0 . √ x² μ
tab bksp CLR n
ENTER Cancel p

Freq 1 = 12,K
Freq 2 = 300,K
db1 = 0
db2 = -80,

db

Frequency

Enter the range of frequencies to be plotted. A value of zero is not allowed.

Set as Defaults Restore Defaults

Abb. 4: Eingabemaske für das Diagramm

Nach Bestätigung mit ENTER erscheint das Diagramm. Wir sehen oben die für ein Chebyshev-Filter typische Welligkeit im Durchlaßbereich und die steil abfallende Flanke im Sperrbereich. Fährt man mit dem Zeiger in das Diagramm, dann hängt an ihm eine senkrechte rote Linie. Bei einem Klick mit der linken Maustaste erscheinen Dämpfung und Frequenz in der Kopfzeile des Diagramms; so läßt sich die Kennlinie genau untersuchen. Klickt man auf das Feld „Add Return Loss Plot“, dann erscheint zusätzlich die Kurve für die Anpassung des Filters an die Systemimpedanz.

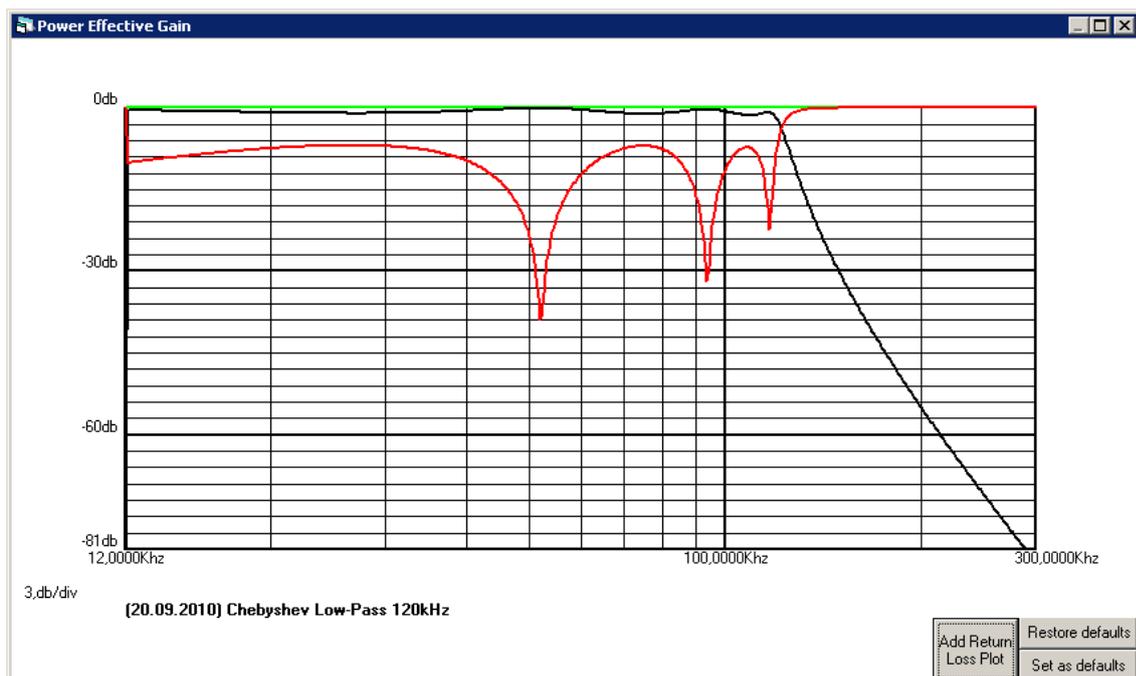


Abb. 5: Berechneter Verlauf von Durchlaßdämpfung und Anpassung beim Tiefpaß

Tiefpaß

Das Programm ermöglicht die genaue Untersuchung von allen möglichen Werten eines Filters, wie Anpassung an die Systemimpedanz bei Ein- und Ausgang, Phasengang, Gruppenlaufzeit, Sprungantwort und anderes mehr. Wer genaueres wissen will, muß nur die sehr ausführliche Hilfe durchlesen. Als Beispiel ist in Abb. 6 die Eingangsimpedanz des vorher berechneten Tiefpasses zu sehen. Weil das Filter symmetrisch aufgebaut ist, sind in diesem Fall die Kurven für Ein- und Ausgang gleich.

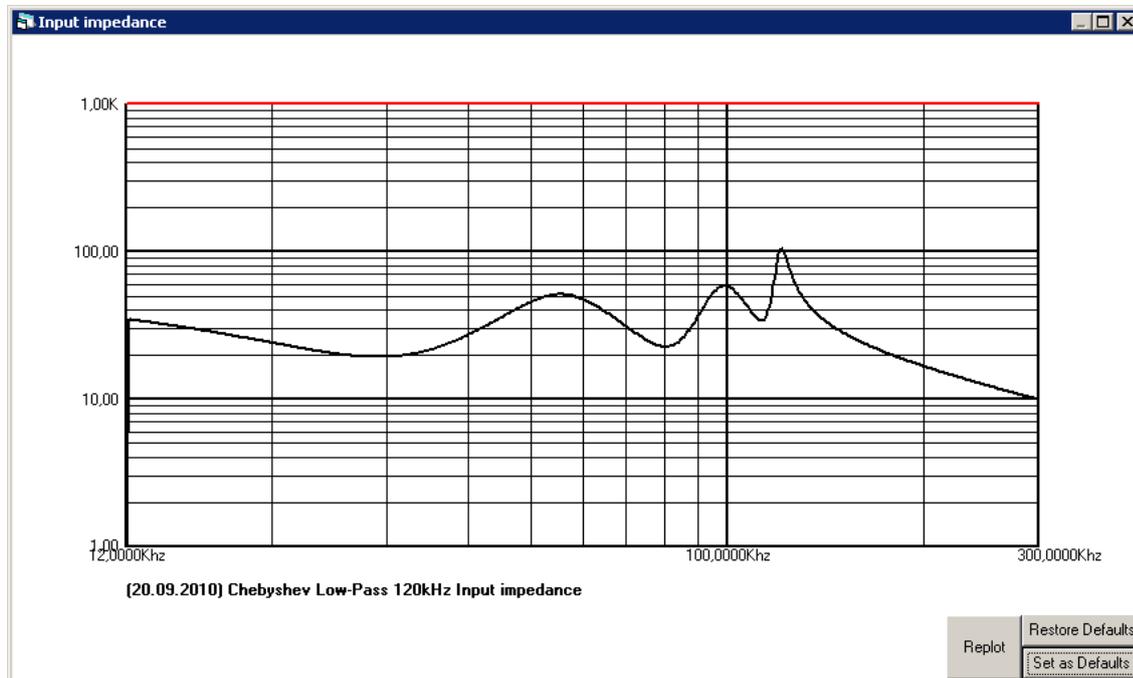


Abb. 6: Verlauf der Impedanz am Filtereingang

Im nächsten Schritt geht es an die Planung des mechanischen Aufbaues. Freiluftverdrahtung dauert zwar nicht so lange wie das Anfertigen einer kleinen Leiterplatte, aber die mechanische und damit auch die elektrische Stabilität der Anordnung wäre sehr filigran. Nachdem es sich in diesem Fall um Meßzubehör handelt, geben wir der Leiterplatte den Vorzug. Dazu müssen wir uns bei den Bauteilen auf eine Bauform festlegen. Weil das Filter nur im Milliwatt-Bereich verwendet werden soll, reichen in diesem Fall Folienkondensatoren mit 5 mm Anschlußabstand aus.

Bei den Spulen wird es schwieriger, denn nicht nur die errechneten Werte der Induktivität sollen so genau wie möglich getroffen werden, auch die Güte der Spulen soll möglichst groß sein. Weil es sich um krumme und aus hochfrequenztechnischer Sicht verhältnismäßig große Werte handelt, bleibt nur die Verwendung von Metallpulverkernen oder gesinterten Ferritkernen und das Wickeln von Hand übrig. Das liest sich im Moment recht aufwendig, ist aber nicht so schlimm, wie man annehmen möchte.

Zwei Bauformen stehen zur engeren Wahl: Der in der Elektronik oft anzutreffende Ringkern und der Doppellochkern. Ringkerne gibt es in vielen Größen und einer ganzen Reihe unterschiedlicher Materialien, die entweder aus Metallpulver oder aus Ferrit bestehen.

Ersteres ist magnetisierbares, feinkörniges Pulver, bei dem die Körner von einer dünnen Kunststoffschicht umgeben sind. Sie werden unter Druck in eine Form gepreßt und soweit erwärmt, daß der Kunststoff an den Korngrenzen zu schmelzen beginnt und sich mit den Nachbarkörnern verbindet. Das Metallkorn im Inneren bleibt jedoch von den anderen Körnern elektrisch isoliert. Das Ergebnis ist ein Kern, der wegen der winzigen Körner kaum Wirbelströme und damit sehr geringe Ummagnetisierungsverluste hat, aber auch vergleichsweise geringe Permeabilität. Zum Erreichen einer bestimmten Induktivität sind daher verhältnismäßig viele Windungen notwendig. Das bedingt langen und dünnen Draht, der mehr Widerstand zur Folge hat und so die Güte wieder mindert.

Beim zweiten ist das Ausgangsmaterial ein Eisenoxyd mit Zusätzen, das ebenfalls gesintert wird. Das Produkt ist üblicherweise nicht oder nur sehr schwach elektrisch leitend und hat große Permeabilität, leitet also den magnetischen Fluß sehr gut. Für eine bestimmte Induktivität braucht man weniger Windungen, kann den Draht deswegen dicker wählen und hat somit weniger Verluste im Kupfer. Allerdings

Tiefpaß

sind die Ummagnetisierungsverluste größer als bei einem gleich großen Metallpulverkern, was die erreichbare Güte bei diesen Kernen begrenzt.

Doppellochkerne werden nicht so häufig eingesetzt wie Ringkerne, wahrscheinlich deshalb, weil sie nur von Hand zu bewickeln sind; für uns ist das kein Nachteil. Zumeist bestehen sie aus Ferrit und in aller Regel haben sie durch das in-die-Form-pressen einen Grat, der die Leiterisolation leicht beschädigen kann. Dieser Grat läßt sich mit einer passenden Rundfeile aber soweit entfernen, daß beim Bewickeln keine Kurzschlüsse entstehen. Ringkerne hingegen sind sehr oft mit einem Kunststoffüberzug versehen und machen diesbezüglich kein Problem.

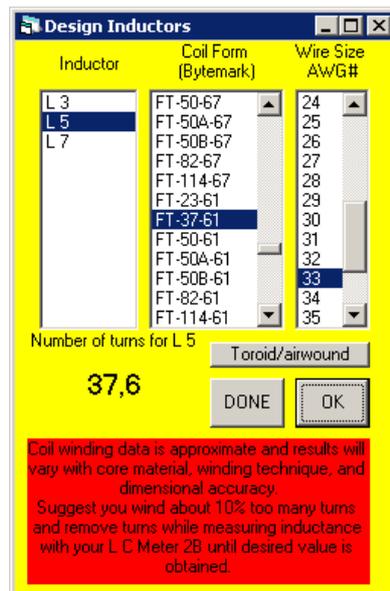


Abb. 7: Der Ringkernrechner

Es gibt viele Hersteller dieser magnetischen Bauteile, eine Suchmaschine führt sicher zum Ziel. Für den hier beschriebenen Tiefpaß kamen schließlich Doppellochkerne aus dem Bauteillager zum Einsatz, die einmal in alten Fernsehgeräten als Antennenübertrager ihren Dienst versehen haben. Zum Erreichen der Soll-Induktivität waren bei denen ungefähr 17 Windungen erforderlich. Zum Abgleich ist ein L-Meßgerät unbedingt notwendig. Bei 9 zumeist unterschiedlichen Exemplaren lag die mit dem NWT ermittelte Güte zwischen 60 und 230.

Doppellochkerne bieten die Möglichkeit, die Induktivität in kleineren Schritten zu verändern, als das bei Ringkernen der Fall ist. Dazu ist der Draht aus einem Loch zurückzuziehen oder durch ein Loch ein weiteres Mal hindurchzuführen. Man gibt sozusagen eine halbe Windung weg oder dazu. Ringkerne bieten diese Möglichkeit nicht, bei denen sind nur ganze Windungszahlen möglich. Die magnetischen Eigenschaften gleich aussehender Kerne sind nicht ganz identisch. Mitunter ist es hilfreich, versuchsweise einen anderen Kern zu bewickeln, um näher an die gewünschte Induktivität heranzukommen. Gewickelt wurde mit 0,4 mm CuL.

Das Programm „Filter Design“ bietet auch hier Unterstützung: Unter UTILITIES gibt es ganz unten den Punkt „Design Inductors“. Damit lassen sich Induktivitäten mit allen möglichen Ringkernen berechnen und auch Luftspulen. Reicht beim gewählten Drahtdurchmesser der Platz auf einer Lage nicht aus, erfolgt eine entsprechende Fehlermeldung.

In einem zweiten Schritt können nun Detailschaltplan und Leiterplattenlayout gezeichnet werden. Alle Schwingkreis Kapazitäten sind zum leichteren Erreichen der Sollwerte aus zwei Kondensatoren zusammengesetzt. Man sollte, wie schon vorher gesagt, möglichst verlustarme Kondensatoren verwenden.

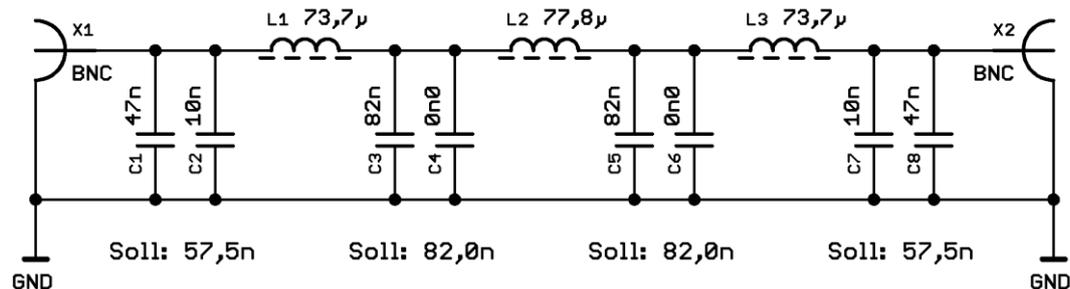


Abb. 8: Detaillierter Schaltplan

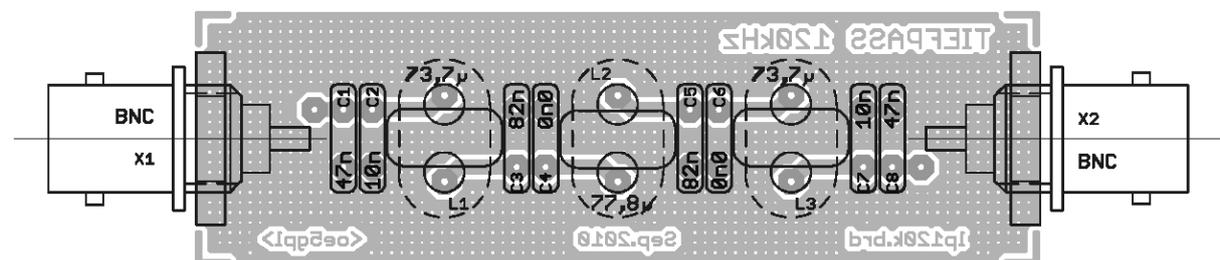


Abb. 9: Bestückungsplan

Tiefpaß

Die BNC-Buchsen sind in senkrecht angelöteten Stücken von Leiterplattenmaterial festgeschraubt, ihr Mittelleiter ist über ein kurzes Drahtstück mit der Leiterplatte verbunden (siehe auch Abb. 1). Für die Leiterplatte ist jedes übliche Material geeignet.

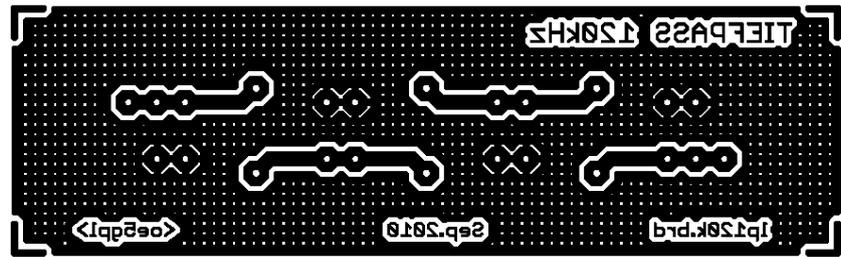


Abb. 10: Leiterplatten-Layout (nicht maßstabsgetreu)

Ergebnis

Mit dem vorhandenen Material haben sich die errechneten Bauteilwerte trotz langwierigem Aussuchen weder bei den Kondensatoren noch bei den Spulen ganz genau erreichen lassen:

C1 + C2	57,5 nF	C7 + C8	57,25nF	L1	71,5 µH, G = 230
C3 + C4	81,52 nF			L2	77,5 µH, G = 210
C5 + C6	81,96 nF			L3	72,6 µH, G = 90

Das Programm bietet uns die Möglichkeit, die gemessenen Werte von Kapazität, Induktivität und Güte in die Maske gemäß Abb. 3 einzutragen und auf diese Weise den Entwurf zu kontrollieren. Dazu klickt man auf das zu ändernde Element, klickt anschließend mit der linken Maustaste auf „Change Values“ und gibt den richtigen Wert ein. Das Diagramm der Durchlaßdämpfung kann nach Eingabe aller Änderungen mit dem Erstentwurf verglichen werden. Abhängig davon, wie groß die Abweichungen der Bauteilwerte von den errechneten Werten sind, werden sich Durchgangsdämpfung und Anpassung im Durchlaß- und Sperrbereich verändern (Abb. 11).

Eine Überprüfung mit dem NWT gibt Auskunft, wie weit die Berechnung mit der Praxis übereinstimmt. Beim Muster beträgt die Dämpfung bei 200 kHz 58 dB, wobei die Durchgangsdämpfung knapp unterhalb von 120 kHz 3 dB beträgt anstatt 1 dB. Diese 2 dB sind auf die verwendeten Billigkondensatoren zurückzuführen und addieren sich ebenso zur Sperrdämpfung. In diesem Fall ist das belanglos, denn die erhöhte Dämpfung kann durch einen um diesen Wert erhöhten Pegel des Generators leicht wettgemacht werden. Ist ein Filter jedoch zur Oberwellenunterdrückung eines Senders vorgesehen, dann ist der kleinstmöglichen Durchgangsdämpfung alle Aufmerksamkeit zu widmen.

Die Berechnung ist also überraschend genau. Beim Vergleich der beiden Bilder ist zu beachten, daß das Programm die Frequenzachse logarithmisch darstellt, der NWT hingegen linear und sie beginnt erst bei 50 kHz. Die Dämpfungspole bei der Anpassung liegen in beiden Fällen auf denselben Frequenzen. Die unerwartete Absenkung oberhalb von 200 MHz ist sehr wahrscheinlich auf unerwünschte Resonanzen bei den verwendeten Bauteilen zurückzuführen. Weil das im diesem Fall nicht stört, wurde dem nicht weiter nachgegangen. Der Detektor des MWT ist unterhalb von -70 dBm nicht mehr linear, seine Rauschgrenze liegt bei -78 dBm.



Abb. 11: Simulation mit den tatsächlichen Werten

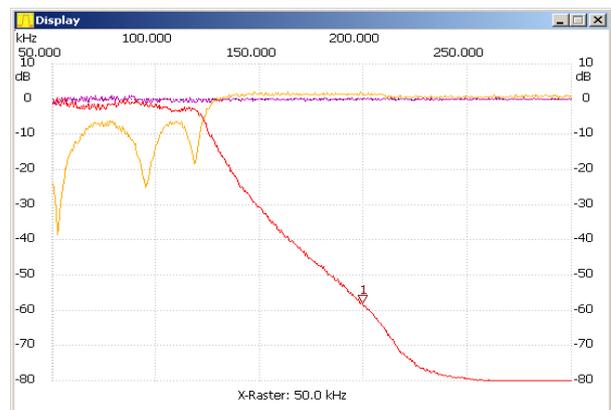


Abb. 12: Gemessener Dämpfungsverlauf

Tiefpaß

Das Programm wartet noch mit weiteren Feinheiten auf: Unter DESIGN, „Crystal Ladder“ kann man verschiedene Quarzfilter berechnen, wie sie in vielen QRP-Geräten zu finden sind und unter „Attenuator Pad“ läßt sich ein Dämpfungsglied berechnen (dafür gibt es allerdings unter [3] im Verzeichnis „SOFTWARE/HELFER“ eine universellere Möglichkeit).

Eine Art von „Reverse Engineering“ bietet das Programm ebenfalls: Gibt man unter UTILITIES bei „Enter Design“ den Schaltplan und die Bauteilwerte eines vorhandenen Filters ein, dann errechnet es in Abhängigkeit von der Frequenz die Dämpfung und die übrigen Kenngrößen. Als Draufgabe ist in diesem Menü sogar ein wissenschaftlicher Taschenrechner enthalten („Calculator“).

Wer an dieser Art des Filterentwurfes Gefallen findet und sich weiter in den Bau von Filtern einarbeiten möchte, sollte bei [4] nachsehen; dort wird auf weiterführende Literatur hingewiesen. Weil der hier beschriebene Tiefpaß kaum für einen Nachbau von Interesse sein wird, gibt es diesmal keine Leiterplatendatei. Der kleine Ausflug in die Welt der Filterberechnung hat hoffentlich Spaß gemacht.

Helmut, OE5GPL

Verweise und Quellen:

- [1] Almost All Digital Electronics, Filter Design and Analysis: <http://www.aade.com/filter.htm>
- [2] Nussbaum, Hans, DJ1UGA, HF-Messungen mit dem Netzwerktester: <http://www.box73.de/catalog/pdf/X-9549.pdf?osCsid=2gq7n4kg5lfu3d0l4k4u32o8q6>
- [3] OAFV-HomePage: <http://www.oe5.oevsv.at>
- [4] WIKIPEDIA: http://de.wikipedia.org/wiki/Filter_%28Elektrotechnik%29