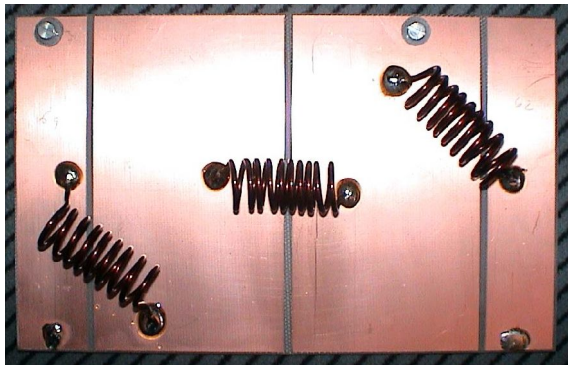


Einfache Tiefpassfilter für KW (kostengünstig aus Platinenmaterial)



Ein 7-poliges Platinen-Tiefpassfilter für 30 MHz

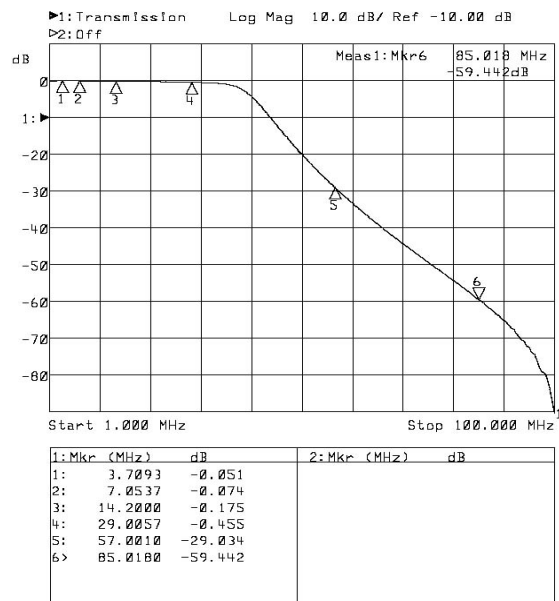
Viele Funkamateure betreiben ihre preiswerten oder selbstgebauten Endstufen ohne ausreichende Tiefpassfilter und verursachen hierdurch einen unnötig hohen Oberwellenanteil. Dies geschieht häufig in Unkenntnis der real existierenden Pegel (fehlende Messtechnik) oder auf Grund von Unsicherheiten hinsichtlich Filterberechnung und Fähigkeiten zum Eigenbau. Auch die Kosten und Verfügbarkeiten von Spezialbauteilen (z.B. bei Hochvoltglimmerkondensatoren) spielen oftmals eine gewisse Rolle.

Hier soll nun die nachfolgende Anleitung helfen, exemplarisch zwei entsprechende Basistiefpassfilter selber herzustellen, wobei die Kosten extrem niedrig sind und keine besonderen Bauteile dafür benötigt werden.

Die beschriebenen Filter eignen sich für Röhren- und Halbleiterendstufen gleichermaßen; sie können allerdings (auf Grund dielektrischer Verluste des Epoxy-Materials, siehe unten) nur mit bis zu ca. 1000 Watt (PEP) Sendeleistung betrieben werden.

Wie bei Tiefpassfiltern eben üblich, werden nur die Oberwellen oberhalb der Filter-Grenzfrequenz entsprechend gedämpft. Bei einem Filter mit z.B. 30 MHz ergibt sich somit folgende Wirkung: Oberhalb des 10m-Bandes ist kein Sendebetrieb mehr möglich. Für

das 10m-Band selber ergeben sich optimale Bedingungen, denn sämtliche Oberwellen (insbesondere doppelte und dreifache Nutzfrequenz) werden -je nach Filtergüte- entsprechend unterdrückt. Für die übrigen KW-Bänder ergibt sich allerdings nur ein Kompromiss mit der Dämpfung unerwünschter Aussendungen (nur oberhalb der Filter-Grenzfrequenz).



Der gemessene Frequenzgang des abgebildeten Filters

Im ungünstigen Fall werden beim Sendebetrieb im 80m-Band (in diesem Beispiel) die Oberwellen zwischen 40- und 10m jedoch unvermindert hindurchgelassen. Nur die darüberliegenden Frequenzbereiche werden durch das Filter wiederum wirksam geschützt (BCI/TVI).

Hier liegt nun auch der Problempunkt, weshalb nur *ein Tiefpassfilter* im Grunde genommen *nicht ausreichend* ist und vielmehr bei einem verantwortungsvollen Umgang mit grossen Sendeleistungen daher für jedes Frequenzband ein entsprechendes Filter normalerweise erforderlich ist.

Dennoch - die beschriebenen Filter leisten *alle* einen wesentlichen Beitrag zur Verminderung unerwünschter Aussendungen - insbesondere ausserhalb der KW-Bereiche...

Wie bereits erwähnt, haben die hier beschriebenen Filter auf Grund der dielektrischen Eigenschaften des Epoxy-Platinenmaterials (Wärme, Verluste) nur eine Belastbarkeit von ca. 1000W (PEP). Anderes Basismaterial (z.B. Teflon) könnte hier weitere Verbesserungen ergeben (Optimierungspotenzial). Ebenso ist eine Kühlung (per Luft oder Montage auf einer Kühlfläche) durchaus denkbar. Auch der sendeseitig erzeugte (und gefilterte) Oberwellenanteil spielt offensichtlich eine gewisse Rolle, denn mit verschiedenen Endstufen (bei gleichen Ausgangsleistungen auf gleichen Frequenzen) entstehen durchaus unterschiedliche Erwärmungen in den Filtern. Da die Durchlassdämpfungen der berechneten Filter sehr gering sind (unter $-0,5\text{dB}$), ist davon auszugehen, dass teilweise die Energie der Oberwellen in den Filtern selber vernichtet wird, was wiederum ein Vorteil für die PA wäre (Schutz der Endstufe vor rücklaufender Energie aus den Filtern). Diese Annahme habe ich bisher aber noch nicht messtechnisch ausreichend untersuchen können.

Übrigens können die beschriebenen Filter (auf Grund ihrer symmetrischen Aufbauweise) problemlos auch in den Empfangsweg eingeschleift werden, ohne dass sich merkliche Nachteile ergeben (sehr geringe Durchgangsdämpfung).

Berechnung der Platinenkapazitäten

Mein verwendetes beidseitiges Epoxy-material mit ca. 1,5mm Stärke und etwa 35u Kupfereauflage weist eine Kapazität von ca. 450pf bei einer Fläche von 100x160mm (Eurokarte) auf. Daraus resultierend ergibt sich eine Kapazität von ca. 1pf bei $35,6\text{mm}^2$.

Also z.B. für 100pf benötigen wir somit eine Fläche von 3560mm^2 bzw. $35,6\text{cm}^2$. Bei einer Platinenbreite von 100mm abzüglich 2x 1mm Rand* (=98mm) bekommen wir somit für 100pf

eine Länge der Kupferfläche von $3560\text{mm}^2 / 98\text{mm} = \text{ca. } 36,3\text{mm}$ und können auf diesem Wege nun die Kupferfläche(n) entsprechend einteilen.



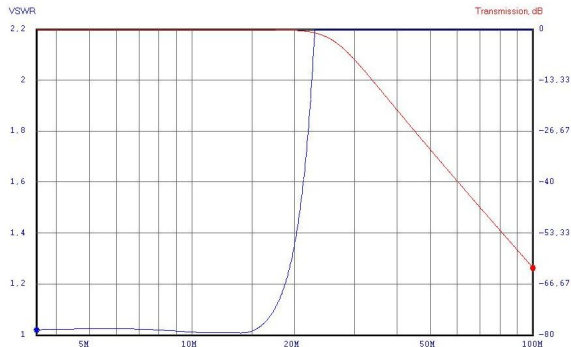
3 Kondensatoren, 95, 254 und 94pf auf einer Eurokarte

Berechnung der Filter

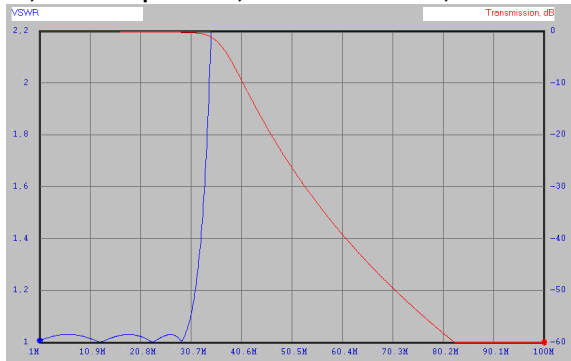
Häufig ist es schwer, bei einer eigenen Sendeanlage die (minimal) benötigte Filterdämpfung hinsichtlich der vorhandenen Oberwellen genau zu bestimmen, denn bereits erste und zweite Oberwelle gelangen bekanntlich (wenn keine Übersteuerung des Senders vorliegt) stark gedämpft an die Antennenbuchse. Weitere Einflüsse, wie z.B. Antennentuner, SWR, Kabel und Antenne reduzieren diesen Anteil nochmals. Bereits ein einfaches Tiefpassfilter hat nur ein gutes SWR im Durchlassbereich und die Oberwellen werden oberhalb der Grenzfrequenz in Folge eines schlechteren SWR's zu Teilen wieder in den Sender reflektiert. In der ganzheitlichen Betrachtung würde daher in vielen Fällen ein einfacheres Tiefpassfilter bereits die notwendige Dämpfung der unerwünschten Aussendungen ausreichend bewirken. Also: *Ein "kleines" ist besser als keines!*

Die Filterberechnung selbst ist bekanntermassen relativ komplex (und sollte daher hier auch nicht weiter erörtert werden). Mittlerweile gibt es jedoch eine Vielzahl von geeigneten Berechnungs- und Simulationsprogrammen. Im vorliegenden Fall wurden die

Filter einerseits natürlich hinsichtlich der gewünschten Durchlass- und Dämpfungseigenschaften, sowie des Durchgangs-SWR's berechnet, andererseits aber auch die maximal-verfügbare Platinenkapazität einer Euro-Karte (ca. 450pf) zu Grunde gelegt. Hieraus ergeben sich dann durchweg auch gute Kompromisse für verschiedene Tiefpassfilter zwischen 14,5 und 29,5 MHz.



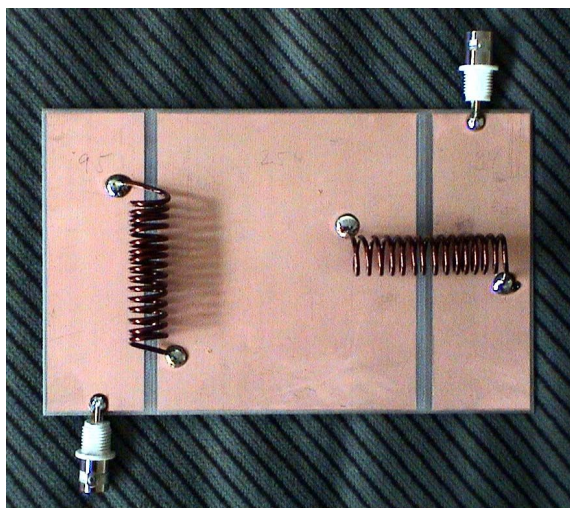
14,5 MHz-Tiefpassfilter, Durchlasskurve rot, SWR blau



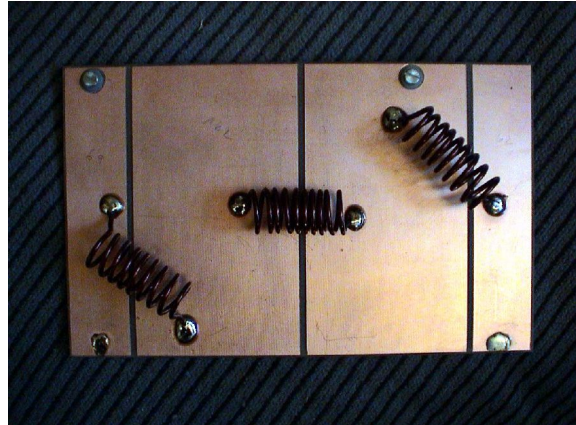
29,5 MHz-Tiefpassfilter, Durchlasskurve rot, SWR blau

Zwei preiswerte Platinenfilter

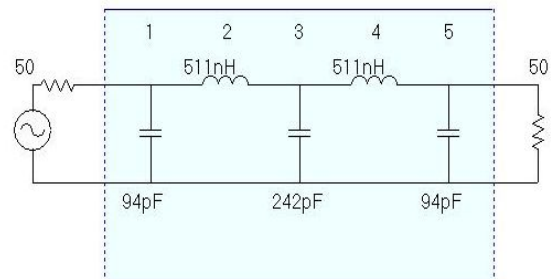
Zwei Beispiele möchte ich hier vorstellen: Ein 5-poliges LPF für ca. 14,5MHz und ein 7-poliges für ca. 29,5 MHz.



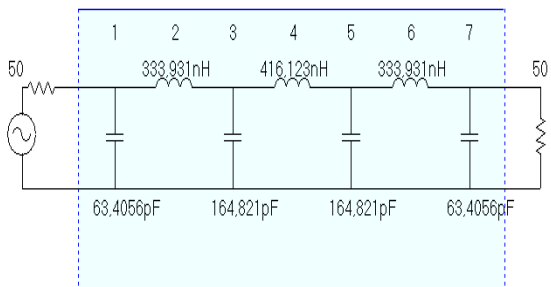
Ein 5-poliges Tiefpassfilter für 14,5 MHz



Ein 7-poliges Tiefpassfilter für 29,5 MHz



Schaltbild des 5-poligen Filters



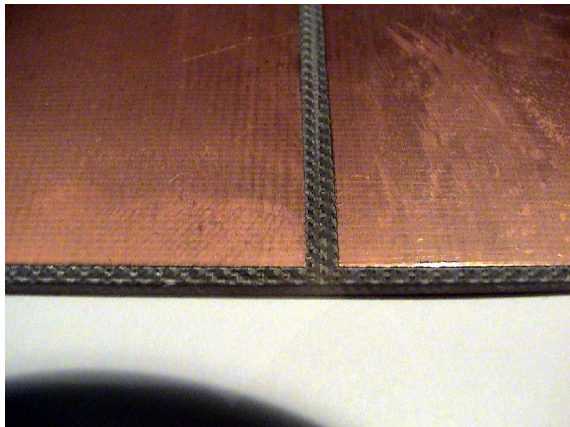
Schaltbild des 7-poligen Filters

Beide Filter wurden berechnet, simuliert und anschliessend am Messplatz nachgemessen. Zum Abschluss wurden die Filter dann praktisch an meiner Röhren-PA (AL-811H) und meiner grossen ARF1500-MOS-FET-PA (siehe anderer Artikel) erprobt. Bei den 1500...2000W der MOS-FET-PA ist jedoch Vorsicht geboten und allenfalls Impulsbetrieb bzw. SSB-Modulation in Folge der Platinenerwärmung kurzfristig möglich.

Die Spannungsfestigkeit der Epoxy-Platinen ist jedoch bei sauberem Aufbau gewährleistet (keine HF-Überschläge). Für den Betrieb im "Legal-Limit" (um 750W) dürften die Filter jedoch absolut ausreichend sein.

Zur praktischen Herstellung*

In einem anderen Artikel habe ich bereits die Herstellung von Platinenkondensatoren beschrieben, sodass hier nur auf das Erfordernis von ausreichenden Kupfer-Rändern (ca. 1mm) wegen der Spannungsfestigkeit hingewiesen sei. Im Übrigen bevorzuge ich bei diesen besonders einfachen Platinen die Herstellung der Leiterbahnen und Kupferflächen mittels 2mm-Fräser. Wer unbedingt ätzen möchte, bzw. grössere Stückzahlen herstellen will, kann ja die üblichen Verfahren wählen. Die Fräsarbeiten sind jedenfalls in ca. 5min (je Platine) erledigt.



Gefräste Herstellung geht schneller als Ätzverfahren

Grundsätzlich ist anzumerken, dass Epoxy-Platinenmaterial bereits bei diesen Anwendungen im Kurzwellenbereich stark verlustbehaftet ist (fühlbare Erwärmung der Kondensatorflächen bei höheren Sendeleistungen). Wer also ein anderes Trägermaterial (z.B. PTFE/ Teflon z.B. Rogers 3003 oder 4003, ein Polymerharz mit Glasgewebe und eingelagertem Keramikpulver) zur Verfügung hat, sollte dies ggf. mal ausprobieren (siehe Nachtrag am Ende dieses Artikels).

Für den Aufbau der hier vorgestellten Filter benötigen wir jeweils nur eine Euro-Platine und ca. 1 mtr CuL-Draht (1,5... 2mm Durchmesser).

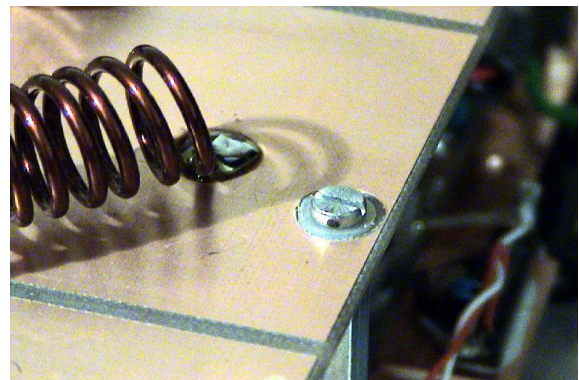
Für das 5-pol-Filter fräse ich die Kupferfläche einer Seite in 3 Teile gem. o.a. Anleitung, sodass sich 2 gleiche und eine grössere Kapazität ergeben

(94+242+94pf). Das 7-pol-Filter erfordert hingegen 4 Kapazitäten mit 63+165+165+63pf.

Die Induktivitäten können über ein Spulenberechnungsprogramm ermittelt werden. Ich entscheide mich für 10mm Durchmesser und benötige für meinen 1,6mm-CuL-Draht etwa 15 Windungen über eine Spulenlänge von ca. 40mm. An einem LC-Messgerät wird dann das Ding auf exakte 511nH gebogen. Wer sein Handwerk versteht, braucht nach dem Einlöten nahezu keine Änderungen mehr machen, denn (erstaunlicherweise) stimmen hier Berechnung und Praxis nahezu vollkommen überein (bei HF ja nicht immer so)!

Für die ewigen Zweifler unter euch habe ich extra die berechneten Kennlinien der Filter am Netzwerkanalysator nochmal genau nachgemessen (siehe Bilder weiter unten).

Nachdem die Platine fertig ist (ggf. gut-isolierte Befestigungen beachten), sollten die Kapazitäten nochmal geprüft werden (LC-Messgerät). Toleranzen von 1...3pf sind dabei durchaus möglich.



Isolierte Befestigung mit ausreichendem Abstand

Click on a step to select:

1	-----
2	I=511nH
3	-----
4	I=511nH
5	-----

Source: Enter arbitrary inductance

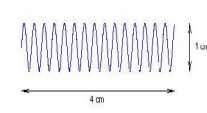
Use list at left:

Inductance: 511nH

Enter any two of these, that will be computed:

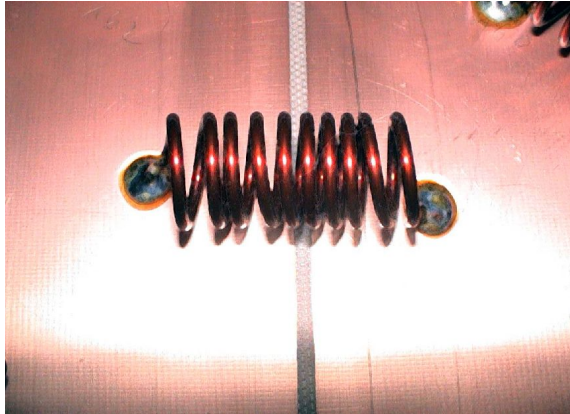
Median diameter (cm):	<input type="text" value="1"/>
Length (cm):	<input type="text" value="4"/>
Turns:	<input type="text" value="15,2"/>

Turns per cm:	3,7999
Wire length (cm):	47,919
Critical gauge:	10



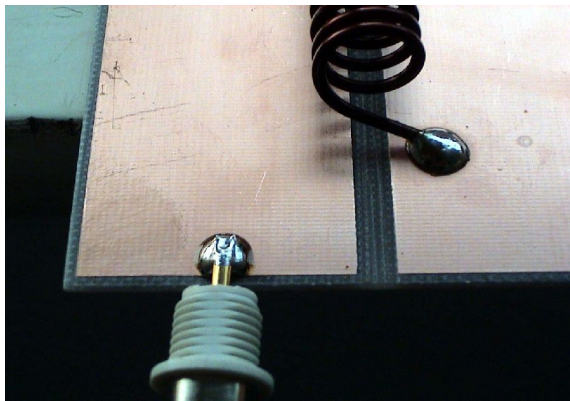
Spulenberechnung für das 5-pol Filter

Im Anschluss werden die Luftspulen berechnet (siehe oben), gewickelt und ebenfalls eingemessen (Biegen, Dehnen nach Bedarf). Beim Einlöten sollte man auf einen möglichst grossen Abstand (untereinander) und Vermeidung von magnetischer Kopplung achten (mögl. 90° Achsen).



Induktivitäten aus 1,5 ... 2mm CuL-Draht

Die Filter verdrahtet man anschliessend optimalerweise mit RG142 (Teflonkoax o.ä.) oder lötet unmittelbar entsprechende Buchsen an.



Obgleich die Filter bereits abgeschirmt prima funktionieren, werden Perfektionisten sicherlich zahlreiche Ideen haben, nette Kisten drumrum zu bauen (z.B. auch aus Platinenmaterial oder in "gekammerter" Bauweise). Dies hat erfahrungsgemäss den Vorteil einer geringfügig besseren Ferndämpfung und vermindert die HF-Abstrahlung im unmittelbaren Nahfeld (am Gerät oder im Raum). Der Nachteil: Die Filter verändern sich dann etwas in Folge von kapazitiven Einflüssen!

Abgleich

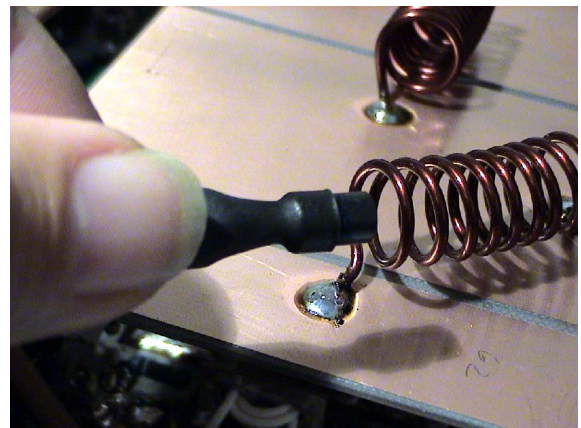
Bei allen Arbeiten mit höheren Sendeleistungen unbedingt **Vorsicht** walten lassen!

Extreme Verbrennungsgefahr bei Berührung und es beisst gewaltig!

Wir schleifen das Filter vorerst zwischen Sender und 50 Ohm Dummyload.

Zum Feinabgleich hilft ein kleines Stück Ferrit, welches -bei Annäherung an die Spulen- das SWR geringfügig verbessert oder verschlechtert. Hieraus kann man dann Rückschlüsse ziehen, ob die Induktivität ggf. grösser oder kleiner sein muss.

Durch (geringfügiges!) Biegen oder Dehnen müsste sich dann anschliessend der optimale Wert ergeben.

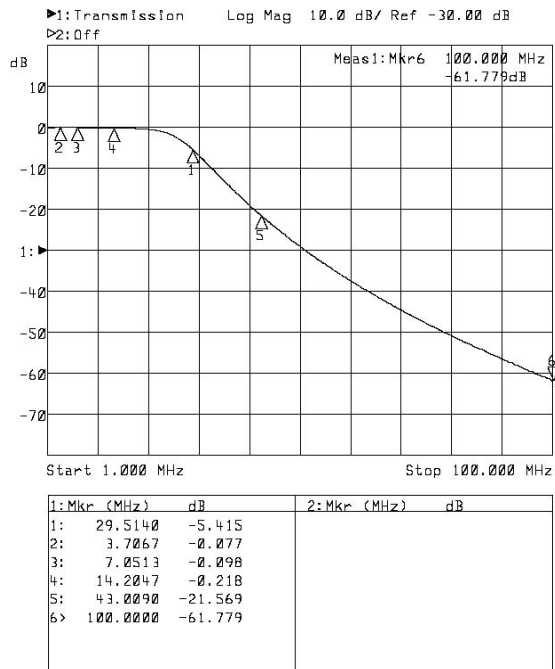


Isolierte Ferrit-Abstimmhilfe: mein "Abgleichdetektor"

Alle aufgeführten Filter wurden so berechnet, dass auch ein Sendebetrieb auf allen tieferliegenden Bändern möglich sein sollte (Tiefpässe mit geringer Welligkeit). Wenn das nicht funktioniert, hat man ggf. keine konstante Ausgangsimpedanz bei der Sende-Endstufe und ein Problem (siehe unten).

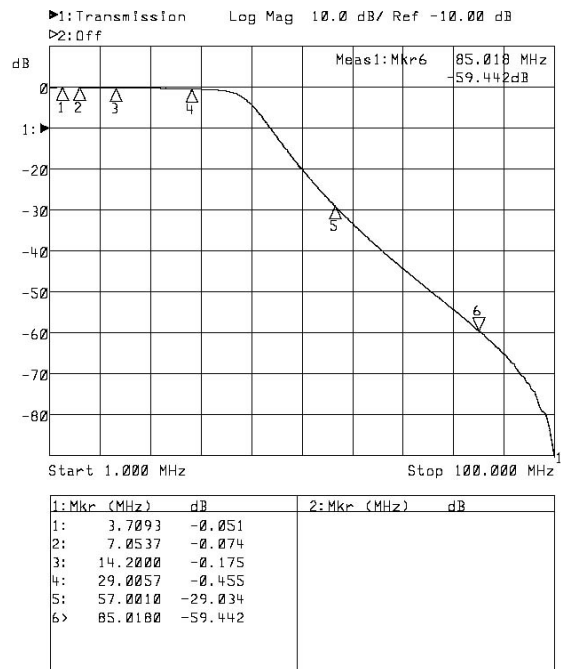
Ein (niedriges) restliches Eingang-SWR nahe der Grenzfrequenz kann auch aus dem reflektierten Oberwellenanteil resultieren und belegt nur die Wirksamkeit des Filters. Dennoch ist eine Überlastung der Endstufe (durch rücklaufende Wellen) unbedingt zu vermeiden!

Messwerte des 5-pol Platinenfilters

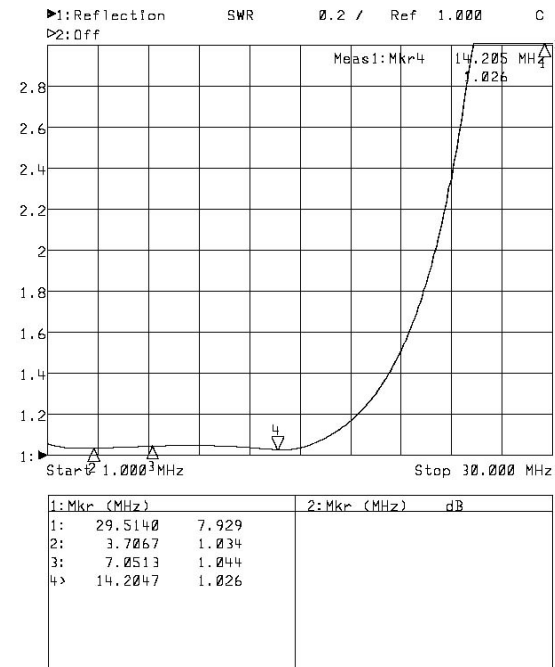


Das Filter zeichnet sich durch eine gute Ferndämpfung aus, wobei jedoch die ersten Oberwellen nur mässig abgeschwächt werden.

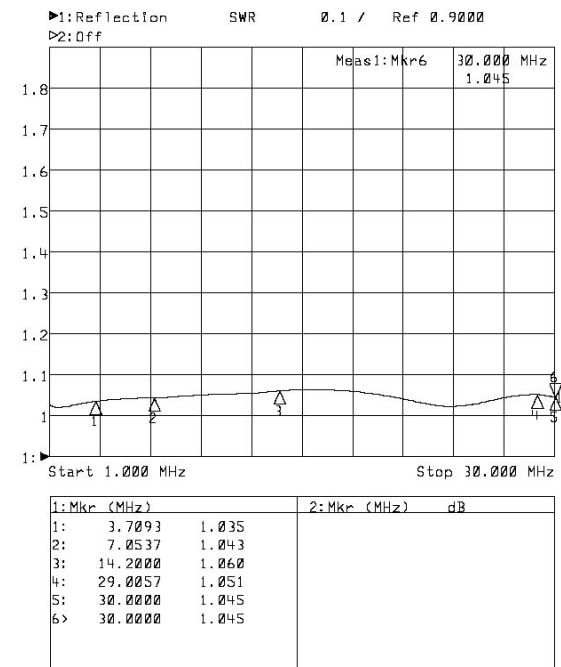
Messwerte des 7-pol Platinenfilters



Dieses Filter hat eine hervorragende Ferndämpfung und ermöglicht den Sendebetrieb auf allen KW-Bändern vom 160...10m-Band. Weil die Oberwellen im KW-Bereich nicht gedämpft werden, sollte dieses Filter besser gegen TVI und BCI eingesetzt werden - oder optimal nur als Filter für das 10m-Band.



Das Durchgangs-SWR im gesamten KW-Bereich ist bis zur Filter-Grenzfrequenz ausgezeichnet. Damit erlaubt dieses Filter einen Sendebetrieb vom 160...20m-Band.



Das Durchgangs-SWR im gesamten KW-Bereich ist bis zur Filter-Grenzfrequenz akzeptabel. Damit erlaubt dieses Filter einen Sendebetrieb vom 160...10m-Band.

Ein Hinweis zu Halbleiterendstufen

Bei nahezu allen breitbandigen Transistorendstufen (so auch bei meiner MOS-FET-PA) sind die Innenwiderstände der Transistoren über den gesamten Frequenzbereich unterschiedlich. Üblicherweise werden sie am Ausgang breitbandig zu ca. 50 Ohm (Mittelwert) transformiert. Dennoch ergibt sich häufig ein realer Impedanzverlauf von z.B. 45...60 Ohm (ggf. noch zusätzlich mit kapazitiven oder induktiven Blindanteilen). Dies bleibt jedoch nicht ohne Folgen für die oftmals auf 50 Ohm berechneten Filter und aus einem "theoretisch guten" Filter (niedrige Welligkeit, Verluste) ergeben sich in Praxis ungünstige Verhältnisse. Ich möchte unbedingt darauf hinweisen, dass nicht jedes Filter (ohne Änderungen) an jeder PA optimal funktioniert. Daher empfehle ich, ggf. Probeaufbauten mit Anschlussbuchsen und SWR-Messgeräten (Eingang/ Ausgang) herzustellen. Dies ist ja absolut kein Problem bei der hier beschriebenen "billigen" Aufbauweise.

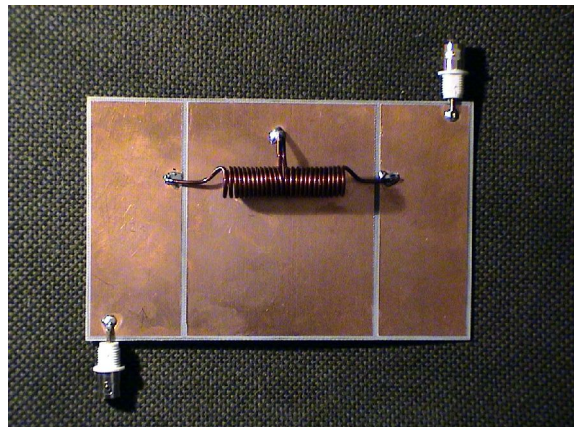
Was sonst noch so möglich ist...

Eine weitere hochinteressante Variante der Platinenfilter ist das Filterdesign mit "magnetischer Gegenkopplung".

Wer sich etwas besser mit den Filtertypen auskennt, mag erkannt haben, dass es sich bei den oben dargestellten Filtern um sogenannte "Tschebycheff-Filter" handelt, die bei geeigneter Dimensionierung einen guten Kompromiss zwischen Welligkeit (brauchbares SWR im Durchlassbereich) und Steilheit bieten. Dennoch benötigt man oftmals noch effizientere Filter, um gerade die doppelte und dreifache Frequenz besser unterdrücken zu können (wegen des hohen Energiegehaltes bei Sendendstufen). Dies geht dann entweder nur mit noch aufwändigeren Filtern, oder einem anderen Filtertyp. Ein Beispiel sind die sogenannten "Cauer-Filter", die jedoch mehr Resonanzkreise

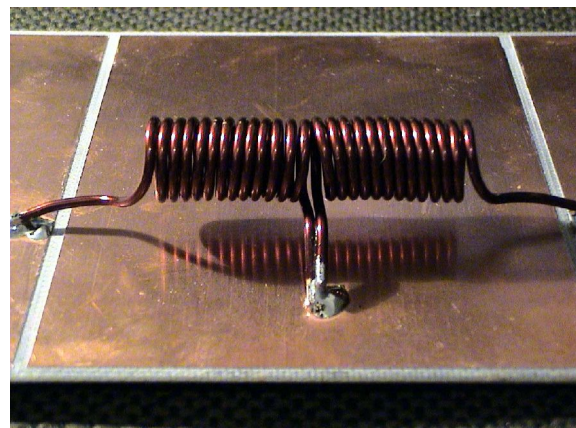
und damit mehr hochbelastbare Bauteile (z.B. Glimmerkondensatoren) benötigen.

Hier kommt nun eine weitere Idee ins Spiel: Wenn man bei den oben gezeigten einfachen 5-pol-Filtern die beiden Induktivitäten in gegengerichtete magnetische Kopplung bringt, bekommt man oberhalb der Grenzfrequenz eine zusätzliche Polstelle, die die Filterwirkung hinsichtlich erster und/ oder zweiter Oberwelle noch erheblich verbessert. Dämpfungen von -20 bis -40dB sind dabei durchaus möglich und ebenso... der Aufbau als Platinenfilter:



Ein Platinentiefpassfilter mit magnetischer Kopplung

Der Grad der Kopplung bestimmt dabei die Frequenz der zusätzlichen Polstelle. (enge Kopplung = tiefere Frequenz).



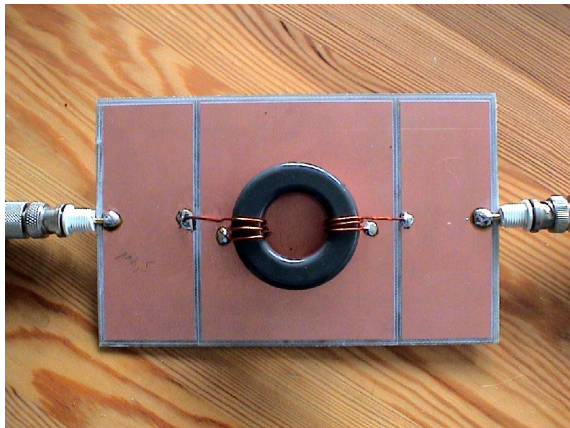
Zwei Luftspulen in magnetischer (Gegen-) Kopplung

Nun ist bei Luftspulen mit hoher Güte schnell das Ende der Fahnenstange erreicht und Spulenkern kommen wegen unserer hohen Sendeleistungen nicht in Betracht ... und würden dann wohl auch schnell verglühen!

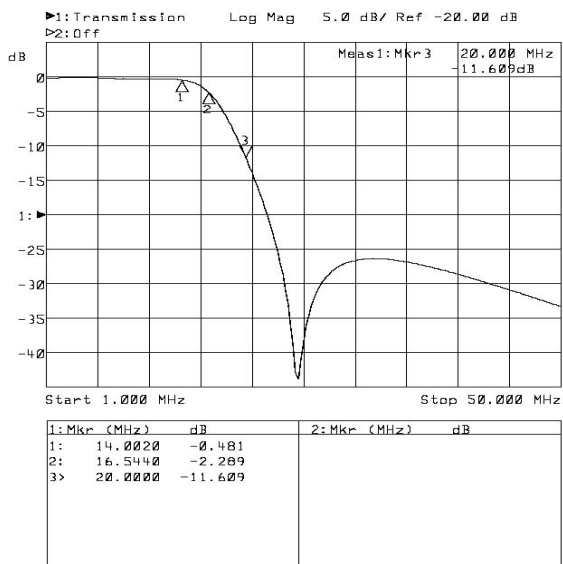
Noch interessanter wird es aber, wenn man einfach dieses Konzept auf "dicke" Ringkerne überträgt:



Zwei Induktivitäten in magnetischer Gegenkopplung



Ein Probeaufbau für 14,5 MHz mit einem T184- Ringkern

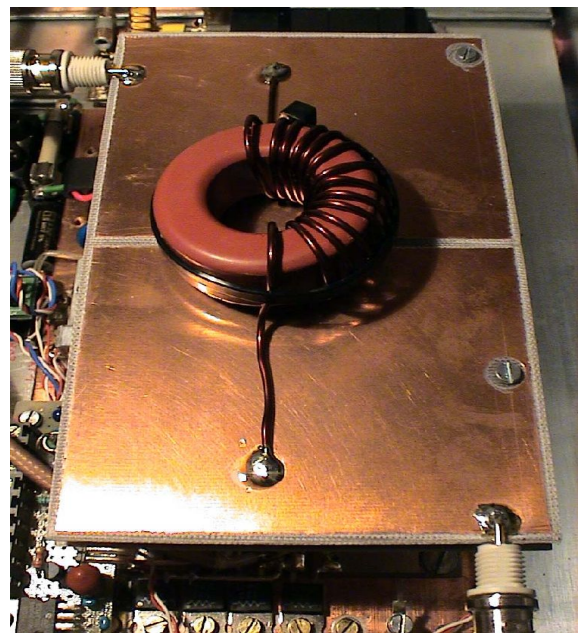


Typischer Frequenzgang des o.a. Ringkernfilters mit einer zusätzlichen Polstelle nahe der doppelten Grenzfrequenz

Einerseits wegen der schweren Reproduzierbarkeit (mir fehlendes Filter-Berechnungsprogramm hierfür) und andererseits wegen einer zusätzlichen

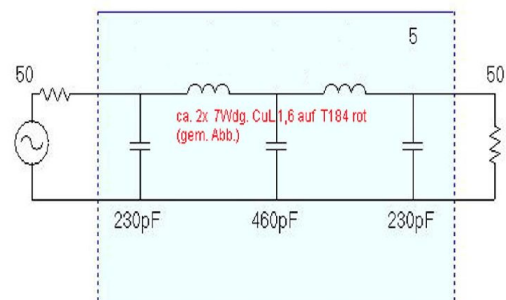
Einschränkung hinsichtlich der maximalen Sendeleistung (auf Grund von Verlusten und thermischer Belastbarkeit) kann ich allerdings vorerst diese Filtervariante nur experimentierfreudigen Praktikern empfehlen!

Wenn man die Bauteile jedoch empirisch ermittelt (Probeaufbau mit Trimmkondensatoren), bekommt man durchaus bei minimalem Bauteil Aufwand auch sehr leistungsfähige Tiefpassfilter, die sich noch gut mit Platinen realisieren lassen...



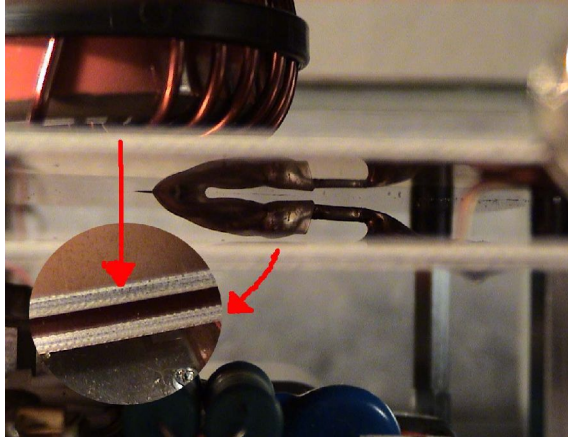
Ein 80m-Tiefpassfilter aus 2 Platinen mit einem Ringkern, probeweise in meiner MOS-Fet-PA montiert

Hier sehen wir ein entsprechendes Filter für das 80m-Band (!), womit auch gleich die Frage beantwortet ist, ob der Filterbau mit Platinenkapazitäten auf diesen tiefen Frequenzen noch möglich ist.



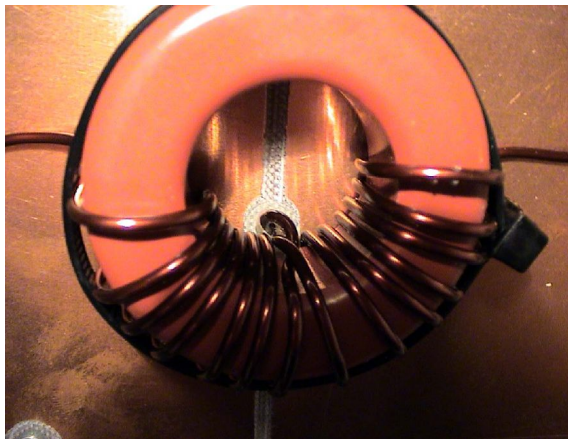
Schaltbild des 80m-LPF mit Ringkern und 2 Platinen

Für dieses Filter benötigen wir 3 Kapazitäten (2x230pf und 1x 460pf), welche wir mit 2 beidseitigen Platinen realisieren können, die im Abstand von 5mm übereinander montiert werden.



80m-Filter aus 2 beidseitigen Eurokarten, 5mm Abstand

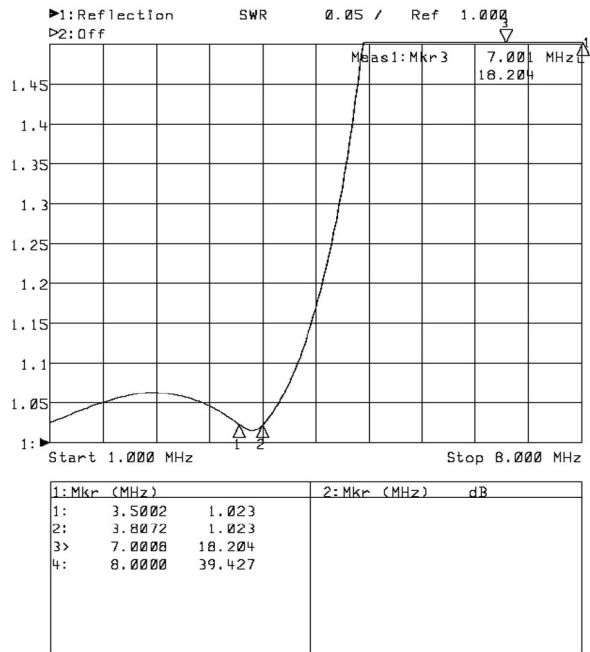
Für die 460pf nehme ich eine ganze Eurokarte und verbinde sie mit dem Mittelabgriff des Ringkerns (durch die darüberliegende Platine hindurch, siehe Bild).



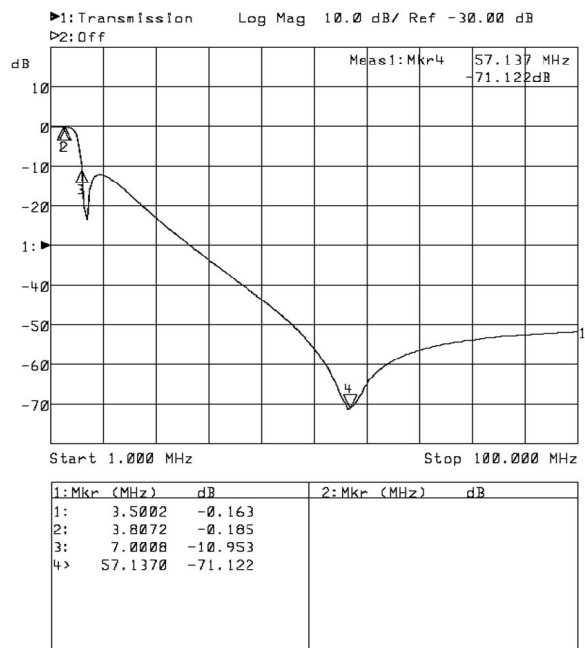
T184 mit 2x 7Wdg, Mittelabgriff an der Platine darunter

Die Messwerte des 80m-Tiefpassfilters sind rechts abgebildet...

Auf Grund der sehr grossen Kondensatorflächen bei diesem Frequenzband ist die Wärmeentwicklung bei sehr hohen Leistungen (>1000 Watt) wieder unkritischer auf dem Epoxy-Material, zumal sich die Wärme hier ja auch auf 2 Platinen verteilt!



Das gute Durchgangs-SWR zwischen 3,5 und 3,8 MHz



Frequenzgang des 80m-Tiefpassfilters mit Ringkern

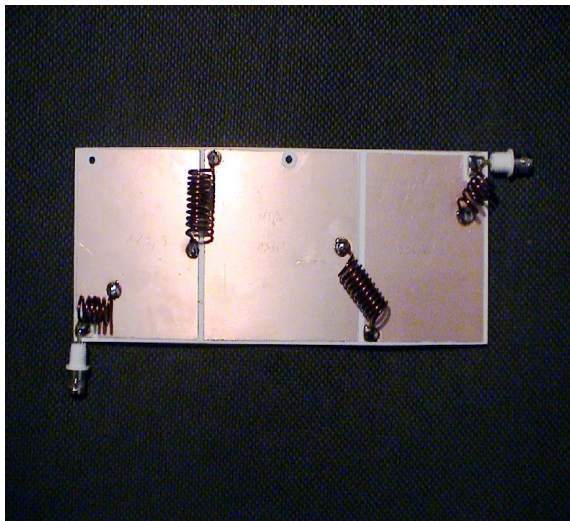
Das hier gezeigte einfache 80m-Tiefpassfilter verfügt (auf Grund der magn. Kopplung des Ringkerns) über eine Polstelle im 40m-Band (=dopp. Freq.). Durch Änderung des Kopplungsgrades auf dem Ringkern (Verschieben der Wicklungen) lässt sich diese Polstelle relativ einfach verändern (z.B. zur dreifachen Sendefrequenz hin - bei noch besserer Dämpfung).

Hierdurch kann man das Filter dann an gerad- oder ungeradzahlige Harmonische ggf. besser anpassen...

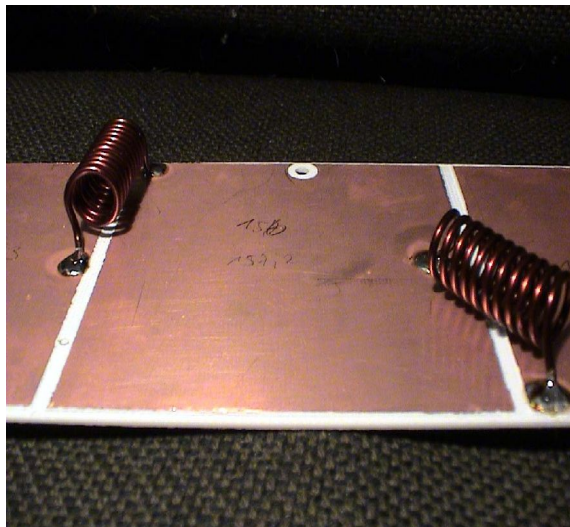
Nachtrag

Versuchsaufbauten auf Materialien mit eingelagertem Keramikpulver haben gezeigt, dass die maximale Belastbarkeit der Platinenfilter erheblich steigt (niedrigere dielektrische Verluste).

Hier sehen wir ein 7-pol-Filter in einer L-C-L-C-L-C-L Anordnung auf 1,5mm Rogers 4003- Basismaterial mit ca. 2,11pf/cm² und einer Länge von 20cm (Belastbarkeit auf Kurzwelle ca. 2 KW).



Hochbelastbares Filter hoher Güte auf Rogers 4003



Nun viel Erfolg beim Eigenbau und beste 73!

DL1JM