

Experimentelles Bandfilter

Ein Pulvereisen-Ringkern genügt

Während Filter für schmalbandige Anwendungen zur Praxis des Funkamateurs gehören, findet man breitbandigere Ausführungen eher selten. Bandfilter kennt man meist als zwei Parallelschwingkreise, die kapazitiv oder induktiv verkoppelt sind. Das folgende Beispiel begnügt sich mit einem Pulvereisen-Ringkern.

Fertige schmale Bandfilter bestehen aus zwei Spulen mit Kern, zwei Kondensatoren und einer Abschirmung aus Blech mit zwei Kammern. Die Spulen weisen oft eine Anzapfung auf. Breitbandige Varianten baut der Funkamateur selbst. Da wird meist mehr probiert als gerechnet. Reicht die Bandbreite nicht aus, so erfahren die Kreise Bedämpfung mit Widerständen.

(R_L) zulassen, durch Transformation, Anpassung von R_G an R_L . Durch den Einsatz im Empfängereingang oder Senderausgang ergibt sich, dass die Dämpfung im Durchlassbereich sehr gering sein muss. Die Kurve soll in diesem Bereich keine Höcker aufweisen. Die Selektion soll dem Zweck angemessen und oberhalb wie unterhalb des Durchlassbereiches

Autor



Dipl.-Ing. Wolfgang Wippermann, DG0SA
 Jahrgang 1950, Amateurfunkgenehmigung seit 1967, Studium Elektronik an der Universität Rostock bis 1974
 Amateurfunkpeilen von 1967 bis 1990
 Besondere Interessen: Simulation und Aufbau funktechnischer Schaltungen; Spulen, Filter, Anpassungen, Baluns und „alles, was gewickelt ist“.

Anschrift:
 Lerchenweg 10
 18311 Ribnitz-Damgarten
www.qsl.net/dg0sa
dg0sa@qsl.net

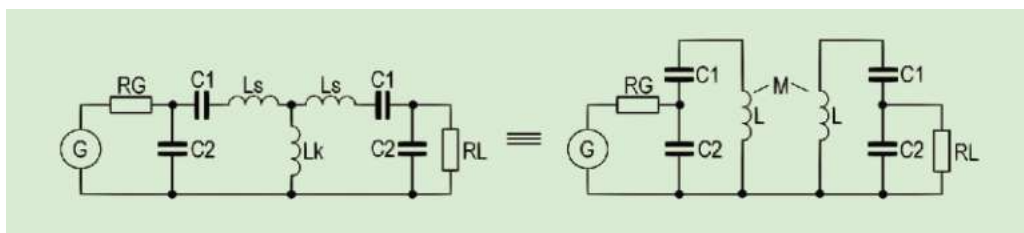


Bild 1: Induktiv gekoppeltes, zweikreisiges Bandfilter, bestehend aus drei Spulen und vier Kondensatoren

Filter für jedes Band

Diese breiten Filter, für jedes Amateurband eines, findet man oft vor einem Empfängereingang und manchmal hinter einer PA. Früher gab es sogar „Bandfiltersender“, in denen die einzelnen Senderstufen durch Bandfilter gekoppelt waren. Alle diese Konstruktionen tragen zu Recht den Namen „Spulengräber“. Sie erfordern einen hohen Aufwand an Messung und Abgleich, wenn sie ihren Zweck erfüllen sollen. Das Wickeln von Spulen ist oft eine ungeliebte Handlung, besonders, wenn sie Anzapfungen aufweisen und eine besondere Wickeltechnik verlangen. Das Bestreben des Autors war, einen einfachen Aufbau zu finden, den jeder Funkamateur bewältigen kann.

- Was soll ein Bandfilter können?
- In einem Frequenzbereich Signale ungehindert passieren lassen
 - Außerhalb dieses Frequenzbereiches Signale sperren
 - Ggf. auch unterschiedliche Innenwiderstände der Quelle (R_G) und Last

gleich gut sein. Im Folgenden liegen solche Bandfilter zu Grunde.

Aufwand verringern

Bild 1 zeigt ein aufwändiges Bandpassfilter, bestehend aus drei Spulen und vier Kondensatoren. Quelle und Last werden durch das gewählte Verhältnis von C_1 zu C_2 angepasst (äußere Kopplung) und die beiden „Kreise“ sind über L_k miteinander verbunden (innere Kopplung). Was unbedingt in die Betrachtung einfließen muss, sind die Innenwiderstände der Quelle R_G und des Lastwiderstandes R_L . Ihr Einfluss ist

groß, denn sie bestimmen entscheidend den Verlauf der Übertragungskurve.

Drei Spulen, drei Kerne – kann sein, muss aber nicht. Bekannt ist die innere Kopplung von zwei Parallelresonanzkreisen allein durch die Gegeninduktivität M . Diese ergibt sich daraus, dass ein Teil der magnetischen Feldlinien des einen Kerns auch durch den anderen Kern geht. Das sind dann nur noch zwei Spulen und zwei Kerne.

Versuche, mittels Pulvereisen-Ringkernen Breitbandübertrager zu bauen, waren zunächst ein Misserfolg, aber genau dieser brachte die entscheidende Idee. Ursache für den Misserfolg waren die verwendeten T50-2- und T50-6-Kerne von Amidon sowie die falsche Annahme, die Verwendung von Ringkernen führt zwangsläufig zu hohen Koppelkoeffizienten nahe $k = 1$.

Eine Messung des Autors ergab bei einer Anordnung zweier gegenüberliegenden Spulen auf nur einem Ringkern

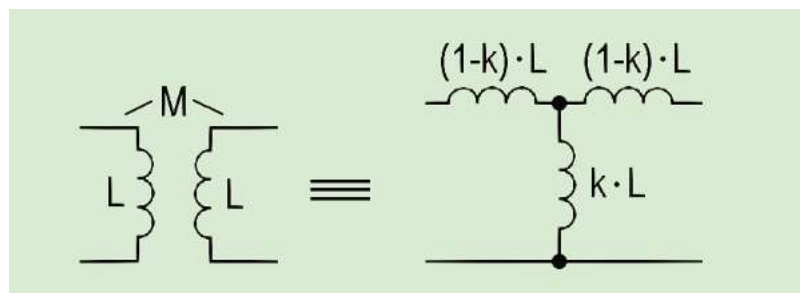


Bild 2: Das Ersatzschaltbild eines verlustfreien, aber nicht streufreien 1 : 1-Transformators

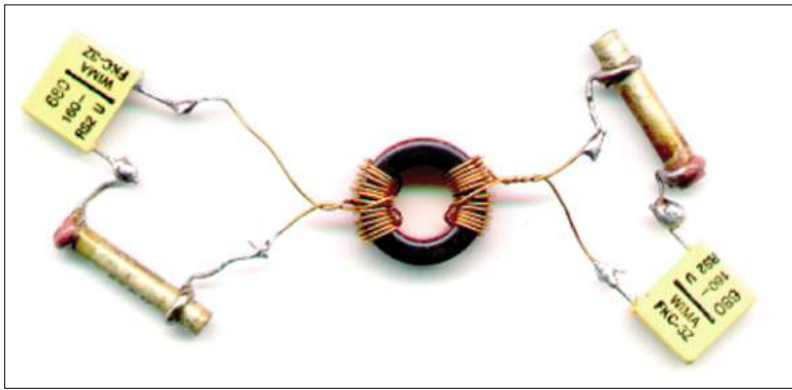


Bild 3: Mit so wenig Bauteilen lässt sich ein Bandpassfilter für das 40-m-Band aufbauen

T50-6 den sehr geringen Koppelfaktor $k = 0,15$. Das ist für einen Breitbandübertrager zu wenig und für ein Bandfilter im Hauptselektionszweig oft zu viel. Aber für den vom Verfasser angestrebten Einsatzzweck ist k zwischen $0,1 \dots 0,2$ genau richtig. Ferrit-Ringkerne weisen übrigens bei gegenüberliegenden Spulen etwa $k = 0,5$ auf.

Koppelfaktor und Bandbreite

Die relative Bandbreite eines Filters mit den oben festgelegten Eigenschaften beträgt in Abhängigkeit von k die in **Tabelle 1** gezeigten Werte.

Wollte man ein Eingangs-Bandfilter für einen 80-m-Empfänger entwerfen, welches einen Durchlassbereich von $3,4 \dots 3,9$ MHz haben soll, so ergibt sich aus dem Wert $B/f_0 = 500/3650 = 0,14$ ein anzustrebender Faktor von $k = 0,1$. Das Ersatzschaltbild eines verlustfreien, aber nicht streufreien 1 : 1-Transformators zeigt **Bild 2**. Beim Vergleich mit Bild 1 wird deutlich: Man kann einen Transformator mit einigen Kondensatoren ergänzen und erhält ein Bandfilter. Dieses wird um so schmaler, je geringer der Koppelfaktor ist.

Bei Pulverisenkernen der Reihe T50-2 tritt bei genau gegenüberliegenden Spulen der minimalste Faktor mit $k = 0,15$ und bei T50-6 mit $k = 0,12$ auf. Sehr schmalbandige Filter auf nur einem Kern sind also bei diesem einfachen Aufbau nicht möglich.

So kommt man zur Minimalvariante: ein Kern, zwei Spulen, vier Kondensatoren. Realisierbar sind mit dieser Idee breitere Bandfilter, die zugleich wunderbar entkoppeln, weil Gleichtaktströme nur über die sehr geringe Streukapazität fließen können.

Messung des Koppelfaktors

Eine Primärwicklung von 14 Windungen $0,4$ mm CuL auf einen Ringkern

T50-6 wird aufgebracht, 14 Windungen auf der Sekundärwicklung genau gegenüber. Jede Wicklung beansprucht $1/4$ des Kernumfangs. Der Koppelfaktor lässt sich bestimmen, indem zunächst die Induktivität (L_o) der Primärwicklung bestimmt wird. Es folgt eine Wiederholung der Messung (L_{ks}), jedoch diesmal mit kurzgeschlossener Sekundärwicklung. Für L_o maß der Autor $2,019 \mu\text{H}$ und für L_{ks} $1,951 \mu\text{H}$.

$$k = \sqrt{1 - \frac{L_{ks}}{L_o}} \quad (1)$$

$$k = \sqrt{1 - \frac{1,951}{2,019}} = 0,18$$

Es ist auch möglich, einen LC-Oszillator [3] zu benutzen. Anstelle der Schwingkreispule ist die Primärwindung des Testobjektes zu schalten. Es ergibt sich die Frequenz f_o . Mit dem Drehkondensator lässt sich diese in die Nähe der späteren Einsatzfrequenz, z.B. 14 MHz ziehen. Dann ist die Sekundärwicklung kurzzuschließen, die Messung ergibt f_{ks} . Der Verfasser maß $f_o = 13,98$ MHz und $f_{ks} = 14,22$ MHz.

Dann gilt:

$$k = \sqrt{1 - \frac{f_o^2}{f_{ks}^2}} \quad (2)$$

$$k = \sqrt{1 - \frac{195,44}{202,21}} = 0,18$$

Beide Messungen ergeben nach [1] den gleichen Wert. Erreicht man einen größeren Abstand zwischen den Wicklungen, so wird der Koppelfaktor noch etwas kleiner.

Eine dritte Variante besteht darin, den Wert der primären und der sekundären Wicklung zu bestimmen. So kam der Autor auf $L_{o1} = 2,019 \mu\text{H}$ und $L_{o2} = 1,963 \mu\text{H}$. Dann werden sie in Reihe geschaltet, was zu $L_{r1} = 4,709 \mu\text{H}$ führt. Vertauschen der Anschlüsse einer Wicklung ergibt $L_{r2} = 3,284 \mu\text{H}$.

Dann gilt:

$$k = \frac{L_{r1} - L_{r2}}{4\sqrt{L_{o1} \cdot L_{o2}}} \quad (3)$$

$$k = \frac{4,709 - 3,284}{4\sqrt{2,019 \cdot 1,963}} = 0,18$$

Diese Ergebnisse wurden tatsächlich so vom Autor gemessen und beweisen, dass sich der Koppelfaktor ausreichend genau bestimmen lässt. Dies ist Voraussetzung zum Entwurf gut arbeitender Bandfilter mit definierten Abschlüssen. Die Messung der Induktivitäten erfolgte mit dem Gerät „L/C Meter IIB“ der Firma AADE.

Entwurf des Bandfilters

Bild 3 zeigt alle Bestandteile für ein 40-m-Bandpassfilter. Die Spulengüte kann man bei den verwendeten Ringkernen mit $Q = 100$ oder besser annehmen. Die Breite der nach diesem Vorschlag entworfenen Filter ist relativ

Informationen zum verwendeten Induktivitätsmessgerät finden Sie unter www.aade.com/lcmeter.htm.

Tabelle 1

k	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
B/f ₀	0,07	0,15	0,23	0,32	0,41	0,51	0,62	0,74	0,87	1,00

Tabelle 1: Koppelfaktor und Bandbreite gegenübergestellt

Tabelle 2

	$L_1 = L_2$ μH	Wdg.	Kerntyp Amidon	C_1 pF	C_2 pF	Werte für Simulation		
						L_s	L_k	L_s
80 m	4,00	20	T50-2 (rot)	1200	680	3,200 μ	0,800 μ	3,200 μ (nicht erprobt)
40 m	2,00	14	T50-2 (rot)	680	330	1,740 μ	0,357 μ	1,740 μ
20 m	1,00	11	T50-6 (gelb)	330	150	0,873 μ	0,187 μ	0,873 μ
15 m	0,67	9	T50-6 (gelb)	220	100	0,630 μ	0,150 μ	0,630 μ
10 m	0,50	7	T50-6 (gelb)	150	75	0,450 μ	0,125 μ	0,450 μ

Tabelle 2: Bauelemente im Überblick. Hinweis zur Windungszahl: Einmal durch den Ringkern stecken ist eine Windung. Verwendet wurde Kupfer-Lackdraht CuL 0,35 mm Durchmesser. Kondensatoren müssen HF-tauglich sein. Die Spulengüte Q ist etwa 100

groß. Dadurch fällt bei den erzielten Güten auch die Einfügedämpfung gering aus. Deshalb ist ein Einsatz denkbar, bei dem das Filter zwischen Antenne und Transceiver angeordnet ist. Im Sendebetrieb entfernt das Bandfilter die Oberwellen, lässt aber die Nutzfrequenz fast ungehindert zur Antenne. Im Empfangsbetrieb entlastet das Filter mehr oder weniger den Rx-Eingang, da es Außerbandsignale unterdrückt. Einen guten Preselektor kann das Filter jedoch nicht ersetzen. Mit der Software RFSim99 [4] (Bild 4 und 5) ist die Durchlasskurve schnell ermittelt. Eine punktuelle Aufnahme mit Messsender sowie Detektor mit AD8307

dauert etwas länger. Die Kurve (Bild 6) sieht durch den linearen Maßstab der Frequenzachse etwas anders aus, als die der Simulation, die Werte gleichen sich jedoch sehr. Um den Pol zu simulieren, wird ein Kondensator eingefügt. Er soll unerwünschte kapazitive Verkopplungen nachbilden. Die Messung der

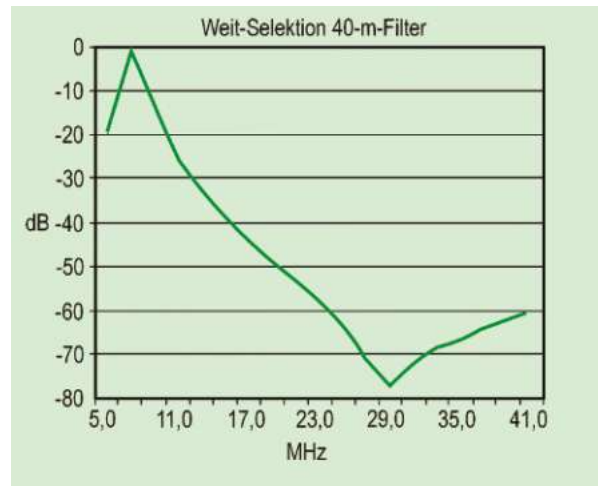


Bild 6: Weitabselektion im 40-m-Band, mit Messsender und Detektor AD8307 punktweise ermittelt

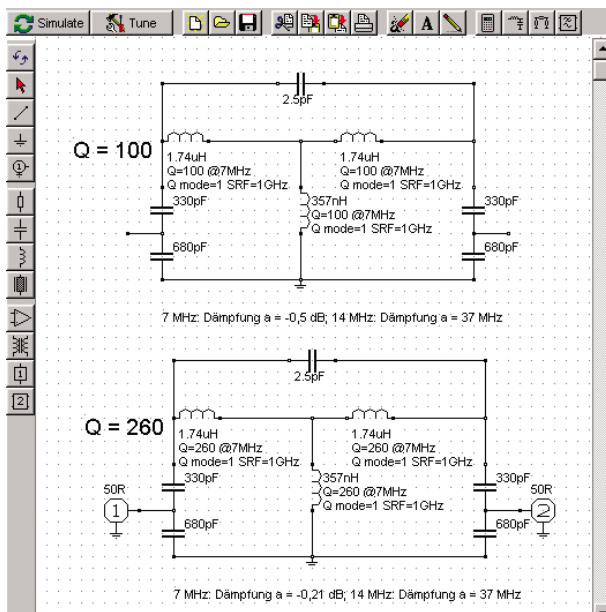


Bild 4: RFSim99 unterstützt den Selbstbau durch Simulation am PC

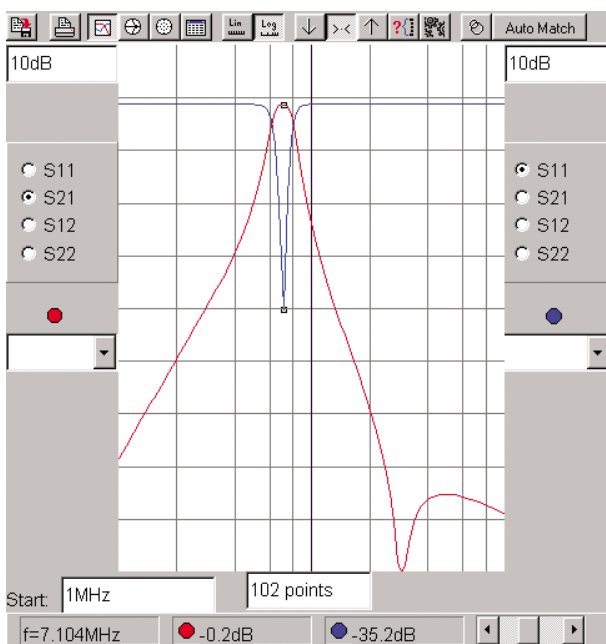


Bild 5: Durchlasskurven (rote Linie) und Anpassungsverlauf (blaue Linie) erlauben Vorhersagen, welche Eigenschaften das Filter erreichen wird

Spulen an einem weiteren Kern ergibt $L = 2,1 \mu\text{H}$. Durch Zusammendrücken lässt sich der Wert etwas variieren.

Werte zur Simulation

Nun ist es erforderlich, die Werte für L_k und L_s zu ermitteln.

$$L_k = k \cdot L$$

$$L_k = 0,17 \cdot 2,1 \mu\text{H} = 357 \text{ nH}$$

$$L_s = (1 - k) \cdot L$$

$$L_s = (1 - 0,17) \cdot 2,1 \mu\text{H} = 1,74 \mu\text{H}$$

Man kann jetzt in der Simulation die Spulengüten verändern. Dazu wird das „physikalische Modell“ genutzt, also beim Programm ein Häkchen in das betreffende Feld setzen. Bei $Q = 260$ – ein durchaus realistisches Ziel bei Verwendung großer Kerne und guter Drähte – ergibt sich eine Einfügedämpfung $a = -0,2 \text{ dB}$. Hier wird deutlich, dass Q vor allem Einfluss auf die Einfügedämpfung hat. Die anderen Selektionseigenschaften werden kaum beeinflusst.

Es ist ja auch leicht möglich, den Koppelfaktor zu erhöhen. Das geschieht auf dem Basteltisch, indem die beiden Wicklungen auf dem Ringkern einander genähert werden. Der Einfluss lässt sich über die Vergrößerung von L_k simulieren. Bald zeigt sich für s_{11} eine Kurve, die wie ein „W“ aussieht (Anzeige: Graph Type Square grid). In der anderen Darstellung (Graph Type Smith Z) ist für s_{21} eine kleine Schleife im Zentrum des Smith-Diagramms zu sehen. Das ist jeweils ein Zeichen für eine zu starke Kopplung.

Testaufbau in der Praxis

Ein kleines Chassis für Testzwecke ist aus zwei BNC-Flanschbuchsen und ei-

nigen Gewindestangen oder Distanzstücken schnell zusammengeschaubt (Bild 7). Drei Lötösen an Masse vervollständigen das handliche Teil.

Der Abgleich erfolgt beispielsweise mit einem Antennenanalyzer. Das Filter wird korrekt mit 50Ω abgeschlossen. Beim Durchstimmen zeigt der Analyzer in der Nähe der gewünschten Mittenfrequenz ein gutes Stehwellenverhältnis an. Wenn jedoch an zwei Stellen ein gutes SWR angezeigt wird, z.B. bei 6,8 MHz und 7,3 MHz, ist der Koppelfaktor zu hoch. Das passiert, wenn die beiden Wicklungen nicht exakt gegenüber stehen oder Quelle und Last nicht korrekt angepasst sind. Hier müssen die Wicklungen auf maximalen Abstand geschoben werden. Wenn das nicht reicht, ist C_1 zu vergrößern.

Ist nur noch eine Stelle mit gutem SWR erkennbar, erfolgt der Abgleich auf Bandmitte. Durch vorsichtiges Zusammendrücken oder Auseinanderziehen ist der Punkt mit dem guten SWR in die Bandmitte zu ziehen. Der Autor gibt

Literatur und Bezugsquellen

- [1] Detlef Lechner, Peter Finck: „Kurzwellensender“, 1. Auflage, Militärverlag der DDR, 1979, S. 170 (im Beispiel rechts ist $\sigma_2 = 110/259$ falsch, richtig: $\sigma_2 = 110/300$)
- [2] s. [1], S. 390
- [3] The ARRL Handbook 2000, Chapter 6, 6.42
- [4] Download der Software RFSim99: www.tzm.de/pages/leistungen/emv-hf/hf_downloads.htm
- [5] Online-Berechnung der beschriebenen Filter: www.qsl.net/dg0sa/bf0.htm
- [6] Online-Berechnung eines Bandfilters mit einem Kern, zwei Spulen und zwei Kondensatoren: www.qsl.net/dg0sa/bf3.htm

sich mit einem SWR von 1,2 ($s_{11} = -20$ dB) zufrieden. Damit ist das Bandpassfilter einsatzbereit.

Ziel erreicht

Ein Vergleich zwischen Messung und Simulation zeigt zum einen die Übereinstimmung von Theorie und Praxis und zum anderen, dass es sich um ein „richtiges“ Bandpassfilter handelt. Für das 80-m-Band ist ein solches Filter noch nicht erprobt.

Auf die Gestaltung einer Platine wird verzichtet. Es können auch kaum Aussagen zur übertragbaren Leistung gegeben werden. Im Gegensatz zu Leitungs-

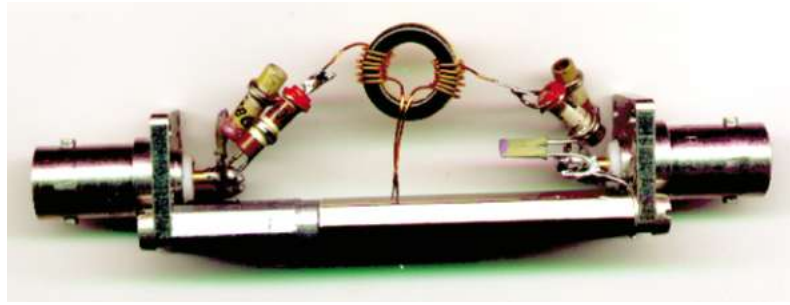


Bild 7: Aufbau für 29 MHz, das lange „Bein“ in der Mitte ist allerdings zu vermeiden

übertragern, muss die gesamte Energie „durch den Kern“ – man kann sich die Mühe machen, die maximal zulässige zu berechnen. Nicht zu empfehlen ist

das Testen, wann die Kerne anfangen zu dampfen bzw. die Kondensatoren zerplatzen.

Die Berechnung der Bauelemente kann leicht mit [5] vorgenommen werden. Das Ergebnis ist ein Bandfilter mit symmetrischem Verlauf der Durchlasskurve. Die Dimensionierung von Bandfiltern mit einem Kern, zwei Spulen und nur zwei Kondensatoren ist ebenfalls möglich [6]. Es ergibt sich zusätzlich eine etwas steilere obere Flanke der Durchlasskurve, welche den bevorzugten Einsatz beim Autor erklärt. Viel Spaß beim Nachbau! DGØSA

Tabelle 3

	3-dB-Bandbreite		Dämpfung bei $2f_0$	Dämpfung >-50 dB ab
	von	bis		
80 m	3,1 MHz	4,2 MHz	-31 dB (7 MHz)	12 MHz (nur Simulation)
40 m	6,2 MHz	8,0 MHz	-37 dB (14 MHz)	19 MHz
20 m	12,8 MHz	16,5 MHz	-34 dB (28 MHz)	32 MHz
15 m	18,0 MHz	23,8 MHz	-42 dB (42 MHz)	51 MHz
10 m	23,5 MHz	32,2 MHz	-39 dB (56 MHz)	72 MHz

Tabelle 3: Aufstellung der Messwerte. Die Einfügedämpfung beträgt etwa $a = -0,5$ dB bei Güten $Q = 100$

Tipps & Tricks

Antennenkoppler für Handfunkgeräte

Wer hat nicht schon einmal daran gedacht, Aufsteckantennen für Handfunkgeräte auf deren SWR zu prüfen? Ein kleiner Koppler für diesen Zweck ist für den geübten Bastler in einer halben Stunde hergestellt.

Als Material kommt zum Einsatz: 19,5-mm-Alu-Vierkantrohr (70 mm lang), zwei 16,5-mm-Alu-U-Profile (16,5 mm lang), BNC-Stecker und -Buchse, zwei RG-58-Stücke á 300 mm, vier Senkkopfschrauben $M3 \times 6$ mm

und je nach SWR-Meter zwei PL- oder N-Stecker.

Längen Sie das 19,5er Vierkantrohr auf ca. 70 mm ab, ebenso die zwei 16,5er U-Profile auf 16,5 mm (**Bild 1**). Nun ist alles zu entgraten, sodass die U-Profile gerade in das Vierkantstück passen. Reißen Sie die U-Stücke mittig an und bohren Sie für den BNC-Stecker und die -Buchse ein Loch. Außerdem bohren Sie am 70-mm-Vierkantrohr oben und unten 6 mm vom Rand ein 3,5-mm-Loch, welches zusätzlich für die $M3 \times 6$ -Schrauben abzusenken ist. Führen Sie beide U-Profile bündig ein und markieren Sie deren Sitz. Nun ist je ein 2,4-mm-Loch für die Schrauben zu bohren und ein $M3$ -Gewinde zu schneiden.

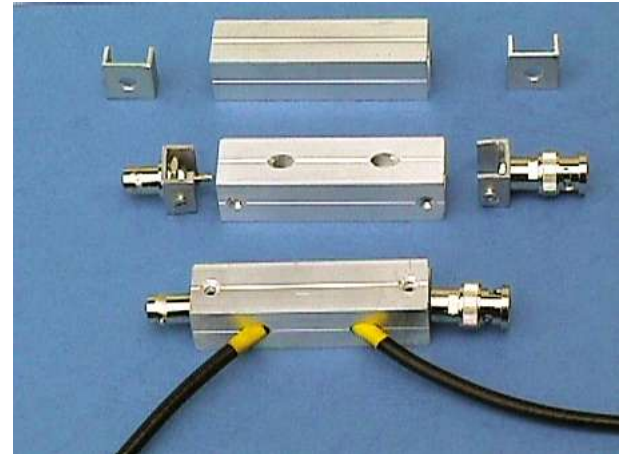


Bild 2: Der gefertigte Antennenkoppler in seinen Aufbaustadien

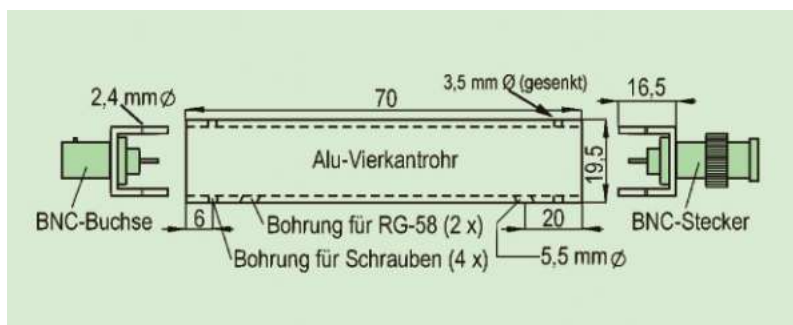


Bild 1: Diese Skizze zeigt den prinzipiellen Aufbau eines einfachen Antennenkopplers für Handfunkgeräte

Im 70er Rohr wird jeweils 20 mm vom Ende ein 5,5-mm-Loch für das RG-58-Kabel gebraucht. Damit es im weichen Bogen aus dem Vierkantprofil austritt, hat es der Verfasser langsam aus der waagerechten Bohrposition in die fast senkrechte angehoben (sauber entgraten). Überziehen Sie das Kabel an der Austrittsstelle mit Schrumpfschlauch. Im letzten Schritt werden der BNC-Stecker/Buchse an das Koaxkabel gelötet, ebenso wie die PL- oder N-Stecker am anderen Ende. Fertig ist der Antennenkoppler (**Bild 2**).

Wolfgang Schäfer, D08PJ