

GESTALTUNG UND KONSTRUKTION  
VON HOHLEITER BANDPASS-FILTERN  
Dennis G. Sweeney WA4LPR  
Zentrum für drahtlose Telekommunikation  
VA Tech  
Blacksburg, VA 24061  
[dsweeney@vt.edu](mailto:dsweeney@vt.edu)

## ABSTRAKT

In diesem Artikel wird das Computerprogramm WGFIL beschrieben, das eine Vielzahl von Beiträgen herstellt und blendengekoppelte (Iris) Hohlleiterbandpassfilter zeigt. Einige Bautechniken für diese Filter, für die keine Werkstatt erforderlich ist, werden beschrieben. Drei und fünf Abschnittsfilter für 10 GHz und ein mit WGFIL gebautes 24-GHz-Filter mit 3 Abschnitten sind als Beispiele enthalten.

## EINFÜHRUNG

Für den Betrieb bei 10 GHz und höher werden Hohlleiterfilter zu einer attraktiven Alternative zu Streifenleiter oder Interdigitalfilter. Leider gibt es nur eine begrenzte Anzahl von Veröffentlichungen über Hohlleiterfilter [1][2]. Es ist viel Industriematerial wie WR-75 und WR-137 vorhanden und es besteht der Bedarf an WR-42-Konstruktionen für 24 GHz LO-Filtern, um unerwünschte Frequenzen vom Amateurband fernzuhalten. Die Techniken zur Gestaltung von Stempeln, Schlitzen und Hohlleiterfiltern (Iris) sind in der Fachliteratur [3] beschrieben, aber zu kompliziert um sie bequem mit einem Taschenrechner zu berechnen.

## WGFIL: HOHLEITER FILTER PROGRAM

WGFIL wurde geschrieben, um diese Schwierigkeiten zu überwinden. Das Programm wird entweder eine Lösung als Stempel oder blendegekoppeltes Filter mit einer der drei möglichen Antworten, Butterworth, Chebyshev, oder Gleichwertiges bei der gegebenen Mittenfrequenz, Bandbreite und Hohlleitertyp, dessen Abmessungen berechnen. Die Bandbreiten für die Filter Butterworth und „gleiche Abschnitte“ gelten für die 3dB Punkte. Die Bandbreite für den Chebyshev wird von der Welligkeit bestimmt. Dies bedeutet, dass die 3-dB-Bandbreite größer als die angegebene Welligkeit der Bandbreite ist. Die Beziehung zwischen den beiden kann berechnet werden:

$$3 \text{ dB BW} = (\text{Welligkeit BW}) (\cosh [(1 / n) \operatorname{arccosh} (1 / e)])$$

Dabei ist n die Anzahl der Filterelemente und das Verhältnis der Chebyshev-Welligkeit (nicht dB) im Durchlaßbereich.

Das Equal Element („gleiche Abschnitte“) - Filter ist Amateuren möglicherweise nicht bekannt. Die Equal Element Charakteristik sieht wie ein Butterworth mit einer „Nase“ aus. Seine Stopband- Charakteristik ähnelt der eines Butterworth-Filters. Es ist möglich, die Anzahl der Filterabschnitte für „gleiche Abschnitte“-Filter anhand der Butterworth-Filterkurven [4] abzuschätzen. Diese Element- Filter haben den geringsten Verlust für eine gegebene Anzahl von Abschnitten, obwohl die kleine Welligkeit Chebyshev sehr ähnlich ist [5] und alle Abschnitte gleich sind. Sie benötigen nur zwei unterschiedlich große Stempel für das gesamte Filter, wobei der Chebyshev für jedes Paar einen anderen Stempel als Resonator benötigt.

Die vom WGFIL berechneten Filter bestehen dabei aus Serienlängen der Übertragung im Hohlleiter mit induktiven Nebenschlussreaktanzen, angeordnet zwischen jeder Sektion der Übertragungsleitung. Die Shunt-Reaktanzen sind entweder induktive Stempel, die über der breiten Wand des Leiters oder die induktiven Öffnungen (Iris/Spalt/Schlitz) angeordnet sind, wie in Abbildung 1 gezeigt.

WGFIL berechnet die elektrische Länge der Übertragungsleitungsabschnitte und der Shunt-Reaktanzen für die Wunschcharakteristik. Wenn induktive Öffnungen verwendet werden, werden diese mit der Dicke null angenommen. Dies ist eine vernünftige Annahme, wenn die Öffnungsdicke geringer ist als ein paar Prozent des Abstandes zwischen den Öffnungen. Die Stempel haben einen endlichen Durchmesser. Daher muss das Programm die elektrische Länge der Übertragungsleitung korrigieren, um diese Durchmesser zu kompensieren. WGFIL berechnet dann die physikalischen Abstände zwischen den induktiven Hindernissen und die physikalischen Dimensionen der Hindernisse. Die Annäherungen für das Maße des Hindernisses sind Marcuvitz [6] entnommen.

Wenn Sie Apertur-gekoppelte Filter bauen, werden die Aperturen im Allgemeinen auf die angegebenen Werte der Breite eingestellt. Bei nachgekoppelten Filtern kann es wünschenswert sein, einen Stempeldurchmesser etwas zu verändern, anders als der vom Programm berechnete. Stempel können aus Standardmaterial gemacht werden. Messingrohr, das in 1/32-Zoll-Schritten (0,794 mm) geliefert wird, und selbst wenn die Stempel von der Stange abgedreht werden, sind sie durch im Durchmesser gestaffelten Bohrer begrenzt.

WGFIL berechnet den Stempel-Durchmesser und fordert dann den tatsächlich verwendeten Stempel-Durchmesser an. Wenn etwas anderes als die berechnete Dicke erwünscht ist, geht WGFIL zurück und korrigiert den Abstand zwischen den Stempeln und passt sie der neuen Stempeldicke an. Verwenden Sie diese Funktion mit Vorsicht, da sich dies auf die Stempelgröße, das Durchlassband sowie die Mittenfrequenz des Filters auswirkt. WGFIL korrigiert nur die Mittenfrequenz. Die Erfahrungen mit Testfiltern scheinen darauf hinzudeuten, dass Stempeldurchmesser toleriert werden können wenn sie sich um 10% geändert haben. Es ist oft möglich, die Mittenfrequenz der Filter so zu wählen, dass die Bandbreite und damit die Stempel einer Standardgröße für Bohrer oder Rohre nahe kommen.

Wenn Iris oder Schlitze verwendet werden, kann deren Abstand von Mitte zu Mitte von WGFIL gegeben sein. Das Ergebnis sind Hohlräume, die um eine Öffnungsdicke zu kurz sind. Die Mittenfrequenz wird zu hoch sein. Durch Metallschrauben in der halben Breite des Wellenleiters auf halber Strecke zwischen jeder Blende wird die Frequenz des Filters verringert.

Metallschrauben können auch auf halbem Weg zwischen den einzelnen Stempeln platziert werden und stimmen das Filter frequenzmäßig tiefer. Gute Ergebnisse werden erreicht, wenn die Mittenfrequenz 1 - 2 % höher als gewünscht gewählt wurde. Die am besten geeigneten Schrauben waren versilbert mit abgerundeten Enden, die aus alten Mikrowellengeräten ausgebaut wurden. Eine Versilberung ist aber nicht erforderlich. Halten Sie die Endrehtiefe der Schrauben möglichst gering, um die Verluste kleinzuhalten. Die Schraubengrößen sind nicht kritisch: 8-32 Schrauben ( $\varnothing$  4,17 x 0,79 mm) wurden in WR-90, 6-32 (3,5 x 0,79 mm) in WR-75 und 4-40 (2,84 x 0,63 mm) in WR-42 Hohlleitern verwendet.

WGFIL verwendet mehrere Näherungswerte, die den Bereich begrenzen, für den die Ergebnisse gültig sind. Ein kleiner Teil der Bandbreite in Bezug auf die Wellenlänge sollte weniger als 20% betragen. WGFIL berechnet und meldet dies als „Leitfaden BW“. Es ist schwierig, Nachfilter zu erstellen die viel breiter als 5% sind, weil die Stempel zu klein werden und die Bandbreiten die viel kleiner als 1% ist, liefert wahrscheinlich keine guten Ergebnisse, da das Programm die Filterverluste nicht berücksichtigt. Eine Annäherung erfordert, dass der Stempeldurchmesser D durch das Hohlleiterinnenmaß geteilt wird. Die Innenabmessung der Breitwand a beträgt weniger als 0,25. WGFIL warnt, wenn  $D / a$  größer als 0,25 ist. Einige Testfilter überschreiten diese Einschränkung, aber es wurden noch gute Ergebnisse erzielt. Im Allgemeinen bringen Annäherungen ein Fehlergebnis, wobei möglicherweise trotzdem brauchbare Ergebnisse über diese angegebenen Grenzen hinaus erzielt werden können

## WGFIL VERWENDEN

Filter 3 zeigt einen typischen Verlauf von WGFIL. Das Beispiel ist das 3-teilige-24-Ghz-Filter das später in diesem Bericht beschrieben wird. Der erste Bildschirm enthält die Anmeldeinformation und Aufforderungen verschiedene Filterparameter anzufordern. Der zweite Bildschirm enthält die berechneten Stempeldurchmesser und eine Anfrage nach den gewünschten Stempeldurchmessern. Wenn die berechnete Stempelgröße akzeptabel ist drücken Sie die <Eingabetaste> dann wird die Stempelgröße akzeptiert und WGFIL zeigt die nächste Betragsgröße an. Wenn ein Betrag anderer Größe gewünscht wird, kann er mit der Aufforderung <Eingabe> eingegeben werden. Der dritte Bildschirm zeigt das fertige Ergebnis an. Beachten Sie die  $D / a$ - Warnmeldung. Wenn ein neues Ergebnis angefordert wird, werden Sie vom Programm zur Eingabe einer neuen Mittenfrequenz mit der Bandbreite aufgefordert. Anschließend wird eine neue Berechnung durchgeführt und Sie kehren zurück, wie im zweiten Bildschirm zu sehen.

## BAUEN VON HOHLLEITER-FILTERN

Die Testfilter wurden mit Standardhohlleitern und Flanschen aufgebaut. Hohlleiter sind oft bei Amateurfesten oder Amateurflohmärkten zu finden und neue Flansche können zu einem fairen Preis zu angemessenen Kosten [7 ] gekauft werden.

Die eleganteste Art Filter zu bauen, ist mit einer Fräsmaschine. Mehrere Testfilter wurden auf diese Weise gebaut, jedoch steht eine solche Ausrüstung den meisten Amateuren nicht zur Verfügung. Eine händische Technik bekam ich von einem pensionierten Mechaniker-Freund. Es braucht eine genaue Schiebelehre oder digitale Schiebelehre, Bohrmaschine, Anreißer, Stahl-Anschlagwinkel und einige Zwingen. Die digitalen Schiebelehren kosten 25-150 USD und sind im Werkzeug- oder Versandhandel erhältlich [8]. Es ist eine gute Investition, wenn Sie viel Mikrowellenarbeit planen.

Schneiden Sie zuerst eine bequeme Länge des Rohres für das Filter ab. Verwenden Sie den Stahl-Anschlagwinkel und eine Flachfeile und feilen Sie die Enden des Rohres quadratisch. Überprüfen Sie Ihre Arbeit. Legen Sie das Stück in den Stahlwinkel und halten Sie beide dann gegen das Licht. Wenn das Ende perfekt quadratisch ist, sehen Sie kein Licht zwischen dem Ende des Stücks und der Klinge des Stahl-Anschlagwinkels.

Ziehen Sie eine Linie in der Mitte des Filterstücks und spannen Sie anschließend die Anreißspitze in die Bohrmaschine. Legen Sie das Filterstück neben einen langen geraden Metallabschnitt. Ein Stück des nicht verwendeten Hohlleiters ist ideal.

Legen Sie den langen Abschnitt so auf den Bohrmaschinentisch, dass die Spitze auf die Mittellinie des Filterstücks zeigt. Mit einer Zwinge klemmen Sie den langen Abschnitt auf dem Tisch. Abbildung 4 zeigt einen typischen Aufbau. Die Bohrmaschine sollte sich entlang der eingezeichneten Linie entlang des geraden Abschnitts bewegen lassen.

Klemmen Sie ein Stück Metall parallel zum geraden Abschnitt des Filterbereichs. Messen Sie zwischen diesem Referenzblock und dem Ende des Filterabschnitts wie in Abbildung 4 gezeigt. Legen Sie den Filterabschnitt so fest, dass sich das erste Loch in der richtigen Position befindet. Klemmen Sie das Filterstück am geraden Abschnitt fest und messen Sie den Abstand zwischen dem Ende des Filters und dem Referenzblock. Wenn zum Beispiel dieser Abstand 4,426 Zoll (112,4204 mm) beträgt dann muss das nächste Loch den Abstand von 0,332 Zoll (8,4328 mm) haben. Nachdem Sie das erste Loch gebohrt haben, lösen Sie den Abschnitt und bewegen ihn 0,332 Zoll (8,4328 mm) in Richtung des Referenzblocks. Der Abstand zwischen dem Block und das Ende des Filterabschnitts sollten jetzt 4.094 Zoll (103,9876 mm) sein. Den Filterabschnitt neu festklemmen und das nächste Loch bohren.

Überprüfen Sie Ihre Messung nach dem Befestigen. "Zweimal messen und einmal bohren!" Mit ein wenig Übung und Vorsicht sollten Sie auf 0,001" (0,025 mm) Genauigkeit kommen. Zuerst an Schrottstücken üben. Bohren Sie zuerst ein Starterloch mit einem Zentrierbohrer und dann die gewünschte Größe ohne den Filterabschnitt zu bewegen. Sie können einen Mittelbohrer Nr. 1, oder einen Bohrer Nr. 2 statt des Zentrierbohrers nehmen. Mittelbohrer sind harte und steife Bohrer zum Vorbohren von Löchern. Sie kosten nur 1-2 US-Dollar und sind bei Werkzeughändlern erhältlich. Für Stimmschrauben bohren Sie nur eine Seite im Hohlleiter, für Stempel beide Seiten. Wenn Sie einen Bohrtisch einrichten, drehen Sie die Bohrmaschine so, dass Sie in ein Tischloch bohren, um nicht in den Tisch zu beschädigen.

Sie können Ihre Arbeit überprüfen, indem Sie die Stempel in die Löcher drücken und den Abstand zwischen den Außenseiten der Stempel mit einem Greifzirkel messen. Nun subtrahieren Sie jeweils den halben Durchmesser der Stempel, dann haben Sie den Abstand von Mitte zu Mitte. Im Allgemeinen ist besser, die Stempel etwas näher zusetzen, als weiter entfernt voneinander. Metall-Abstimmerschrauben senken die Mittenfrequenz des Filters.

Entfernen Sie die Grate des Hohlleiters mit einer feinen Feile, bevor Sie die Stempel einlöten. Die Stempel einfach in die Löcher drücken. Wenn sie zu dicht sind, fließt kein Lot um sie, bei zu locker leidet die Maßgenauigkeit. Halten Sie den losen Stempel beim Löten an einem Ende mit einem Zentrierstift. Eine kleine Lötlampe und viel Flussmittel wird empfohlen. Reinigen Sie das Filter nach dem Löten mit einem Flussmittelfernfer.

Wenn Sie Zugang zu einer Drehmaschine haben, können Sie einige Halterungen für die Stimmschrauben herstellen. Der in 2 gezeigte Halter wurde für die 10-GHz-Testfilter verwendet. Messingprofile für Halter oder Stempel können im Metallhandel bezogen werden [9]. Diese Teile geben dem Endergebnis ein professionelles Aussehen und sorgen für sanfte Abstimmung. Das kleine Stück Plastik unter der Stellschraube ermöglicht kontinuierliche Reibung an der Stimmschraube. Es kann weicher Kunststoff sein. Anstelle der Halter können Sie auf den Hohlleiter eine Mutter für die Schraube auflöten. Halten Sie diese Mutter während des Lötvorgangs mit einer Edelstahlschraube beim Löten fest.

Das Lot haftet nicht am Edelstahl und die Schraube lässt sich nach dem Löten leicht entfernen. Sie können eine Kunststoffmutter nach der Abstimmung als Kontermutter für die Fixierung der Schraube verwenden.

## HOHLEITERFILTER ABSTIMMEN

Die Filtereinstellung kann zum Problem werden. Eine einfache Signalquelle und ein Detektor werden wahrscheinlich für Filter mit zwei oder drei Abschnitten ausreichen, da deren Stoppbänder nicht sehr stark sind und dies könnte durch einen stark verstimmt Filter ergebnislos sein. Sorgfalt in der Konstruktion wird ein Filter ergeben, das nahe am gewünschten Stimmbereich ist. Eine ausgefeiltere Abstimmtechnik ist in [10] oder im Kapitel 11 von [3] beschrieben. Dies ist der sogenannte "Peak-Dip" von Dishal, erfordert jedoch einen geschlitzten Hohlleiter in den ein Draht für den Abgleich „reinschaut“.

Die Genauigkeit der Mittenfrequenz scheint durch die technische Konstruktion stärker eingeschränkt zu sein als durch die Annäherungen in WGFIL. Mit Sorgfalt ist es auf einer Fräsmaschine möglich, Filter zu erstellen, die nur eine kleine oder gar keine Abstimmung erfordern. Sehr schmalbandige Filter sind für Konstruktionsfehler eher anfällig. Der Autor hat 29 GHz 2% BW Filter mit WR28 konstruiert, für die keine Abstimmung erforderlich war. Die vom Autor verwendete Fräsmaschine wird in der Regel für kürzere Kammern eingesetzt, so dass die Filter eine etwas höhere Frequenz haben. Eine Schraube mit einem Mittelschlag in der breiten Wand des Hohlleiters zwischen zwei Stempeln zieht die Resonatorfrequenz nach unten.

## TESTERGEBNISSE

Eine Anzahl von Testresonatorfiltern wurde aufgebaut. Seit dem wurden keine Aperturfilter hergestellt. Die Öffnungen waren für den Autor zu schwierig herzustellen. WGFIL wird jedoch für Sie das Beispiel mit Aperturkopplung in [3] genau reproduzieren. In Tabelle 1 sind die gebauten Testfilter angeführt.

Tabelle 1: Testfilter

WG	Type	Zellen	Mitten-Frequenz	Design 3 dB BW	Gemessen 3 dB BW	Verlust
WR-90	0.1 dB Chev	3	10.368 GHz	138.8 MHz	111.4 MHz	0.67 dB
WR-90	0.1 dB Chev	5	10.368 GHz	130.5 MHz	140.8 MHz	1.64 dB
WR-75	Equal Elem	5	10.368 GHz	102.4 MHz	118 MHz	1.10 dB
WR-42	0.1 dB Chev	3	24.125 GHz	448.5 MHz	441 MHz	1.32 dB

Abbildung 5 zeigt ein Foto mehrerer Testfilter. Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse der 5 Abschnitte im WR-90 Filter. Dieses Filter hat an einem Ende einen Hohlleiteranschluss und am anderen einen koaxialen Anschluss. Der Übergang von Hohlleiter zu Koax ist dem in [1] beschriebenen sehr ähnlich.

Bild 7 ist das Ergebnis des WR-42-Filters. Zwei dieser Filter wurden aufgebaut. Eines wurde auf der Fräsmaschine und das andere unter Verwendung der oben beschriebenen Technik hergestellt. Das auf tausendstel gebaute Filter wurde ohne Stimmschrauben gemessen. Es hatte ein richtige gebildetes Durchlassband, das etwa 0,5% höher als die

Entwurfsfrequenz berechnet ist. Keine Abstimmung für jedermann auf 24 GHz ?! Die beiden verschiedenen, unterschiedlichen WR-42-Filter sind auf dem Foto in Abbildung 5 dargestellt.

## FAZIT

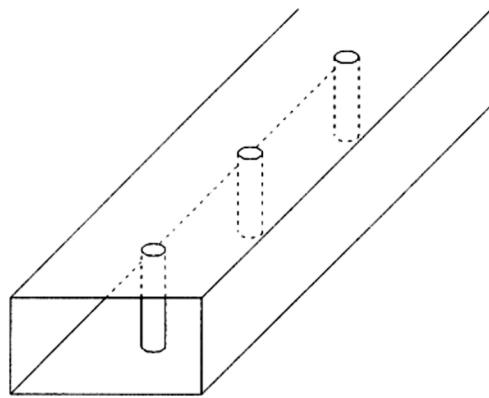
WGFIL sollte ein nützliches Werkzeug für alle sein, die Transverter bauen und Hohlleiter dazu verwenden möchten. WGFIL ist für den nichtkommerziellen Amateurgebrauch zum Preis einer Computerdiskette und Porto erhältlich, falls erforderlich. Es kann entweder unter 5,25 "oder 3,5" MSDOS auf formatierten Medium geliefert werden und sollte auf einem PC-Computertypen ausgeführt werden.

## DANKSAGUNG

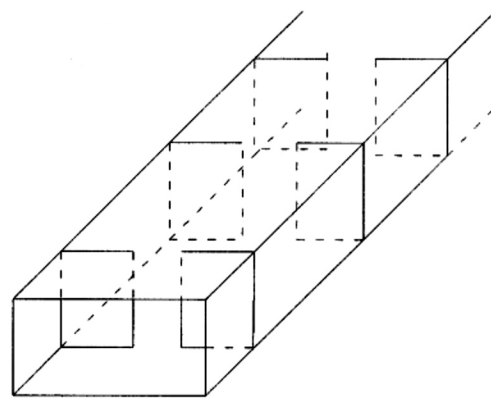
Ich möchte Ken Backer KC4LOL für die Erstellung der Diagramme mit dem HP8510-Netzwerkanalyser danken. Mike Barts, N4GU für die Fotos und die hilfreichen Vorschläge und Joe Hurley für die Bohrtechnik. Vielen Dank auch an AL Ward WB5LUA, der mich ermutigt hat, nach einer einfachen Bautechnik zu suchen.

## REFERENZEN

1. Elmore, Glenn N6GN, "A Simple and Effective Filter for the 10 GHz Band," *QEX*, July 1987, No. 65, pp. 3-5.
2. Gannaway, J.N. G3YGF, and Davies, S.J., G4KNZ ed, *The Microwave Newsletter Technical Collection*, RSGB
3. Matthaei, G., L. Young, and E.M.T. Jones, *Microwave Filters Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures*, Artech House, 1980, section 8.06.
4. Taub, Jesse J., "Design of Minimum Loss Band-Pass Filters," *Microwave Journal*, September 1963, pp. 67-76.
5. Blinchikoff, Herman J. and Antatol I. Zverev, *Filtering in the Time and Frequency Domain*, John Wiley, New York, 1975, pp. 281-286.
6. Marcuvitz, N., *Waveguide Handbook*, Peter Peregrinus Ltd, London, 1986, Ch 6.
7. Lectronic Research Labs, Inc., 665 Winks, Bensalem, PA 19020, 800-358-8378. LRL accepts credit cards. Waveguide must be ordered in 5-foot minimum lengths. The author's last purchase of WR-90 was \$3.90/ft.
8. Rutland Tool & Supply, 2225 Workman Mill Rd., Whittier CA 90601-1437. 800-289-4787, website: [www.rutlandtool.com](http://www.rutlandtool.com). Rutland accepts credit cards.
9. Small Parts Inc., 13980 NW 58th Court, PO Box 4650, Miami Lakes, FL 33014-0650, 800-220-4242, website: [www.smallparts.com](http://www.smallparts.com). Small Parts accepts credit cards.
10. Dishal, M., "Alignment and Adjustment of Synchronously Tuned Multiple-Resonator-Circuit Filters," *Proceedings of the IRE*, No. 39, November 1951, pp. 1448-1455.

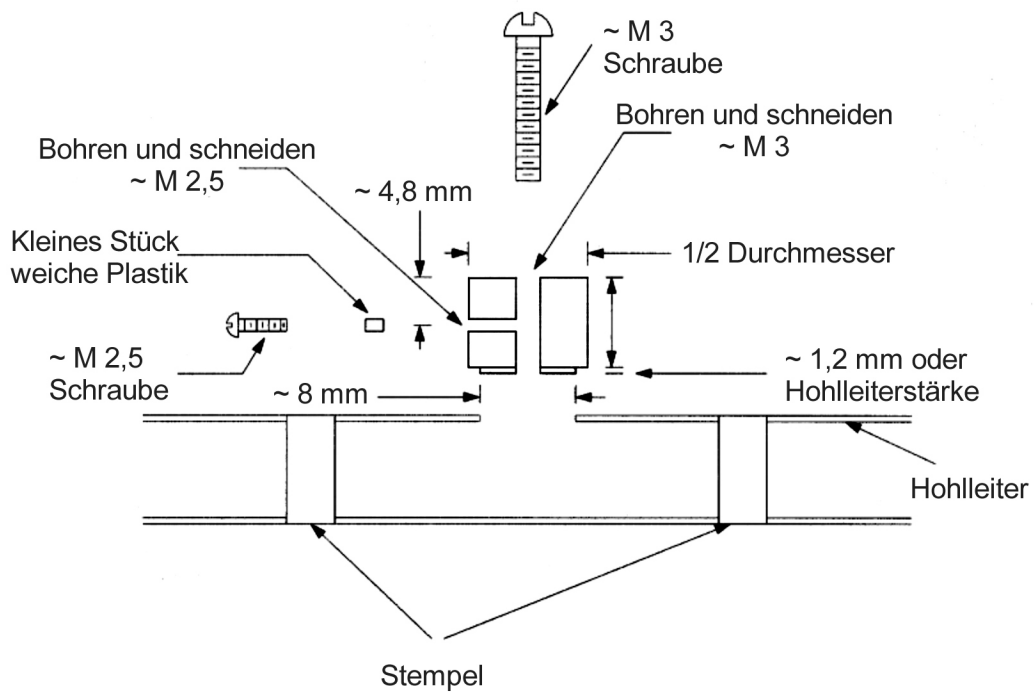


**Stempel-Filter**



**Aperture-Filter**

**Abbildung 1: Hohlleiterbandpassfilter entweder mit Stempeln oder induktiven Öffnungen**



**Abbildung 2: Stimmschraubenhalter**



Waveguide Filter Synthesis Program  
written by Dennis Sweeney WA4LPR  
Version 1.1

Filter type :            Butterworth     : 1  
                          Chebyshev        : 2  
                          Equal Element   : 3  
Enter # of desired type   : 2  
Enter passband ripple in dB: 0.1

Filter structure :       Post        : 1  
                          Iris         : 2  
Enter # of desired type: 1

Enter waveguide width (inches) 0.42

Enter # of elements : 3

Center frequency in MHz = 24362

Bandwidth in MHz = 325

**WGFIL screen 1**

Post Coupled Filter

Calculated Post dia	Desired post dia
Post[0] = 0.0624	0.0625
Post[1] = 0.1251	0.1250
Post[2] = 0.1251	0.1250
Post[3] = 0.0624	0.0625

**WGFIL screen 2**

Post Coupled Filter

Center : 24361.458 MHz BW: 325.000 MHz  
Fractional BW    1.33 %        Guide BW    2.00 %  
Chebychev response, ripple:    0.10 DB

Post diameter	Cavity length	
0.0625"		
	0.3316"	
0.1250		Caution: D/a > 0.25
	0.3735"	
0.1250		Caution: D/a > 0.25
	0.3316"	
0.0625		

Do you wish another design (y/n)? y

Center frequency in MHz = 24300

Bandwidth in MHz = 300

**WGFIL screen 3**

Bild 3: Typischer Verlauf von WGFIL. Als Beispiel das 24-GHz-Filter in Abbildung 5 und 7.



Abbildung 4: Bohrmaschineneinstellung zum präzisen Bohren von Hohlleiterfiltern.  
Das dunkle Objekt in der Mitte ist das zu bohrende Filter. Der Referenz Block ist im Vordergrund rechts.

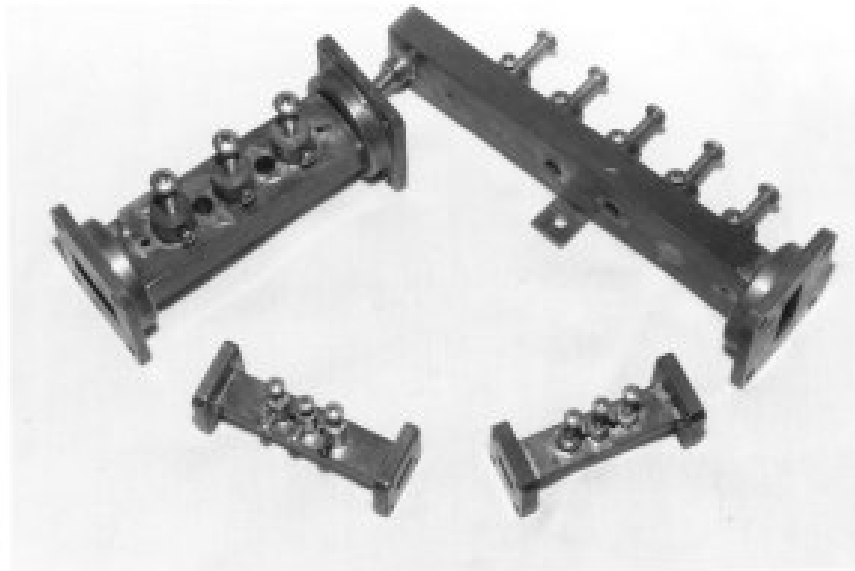


Abbildung 5: Test-Filter. Oben links befindet sich ein 3-teiliges 10-GHz-WR-90-Filter.  
Oben rechts befindet sich ein 10-GHz-WR-90-Filter mit 5 Abschnitten und einem Koax-Eingang.  
Ein 3-teiliges WR-42 24-GHz-Filter, das mit der Fräsmaschine hergestellt wurde, ist unten links.  
Das gleiche Filter, das mit der beschriebenen Technik gebaut wurde, befindet sich unten rechts.

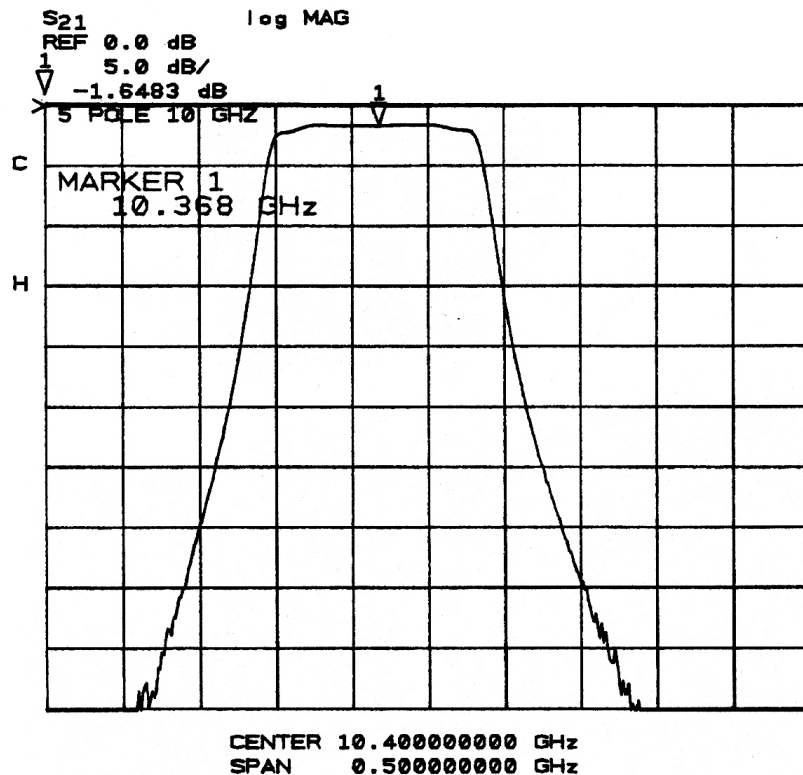


Abbildung 6: Frequenzgangdiagramm des 10-GHz-Filters mit 5 Abschnitten. Die x-Achse ist 50 MHz / Div. zentriert bei 10,4 GHz. Die y-Achse beträgt 5 dB / Div., Oben 0 dB.

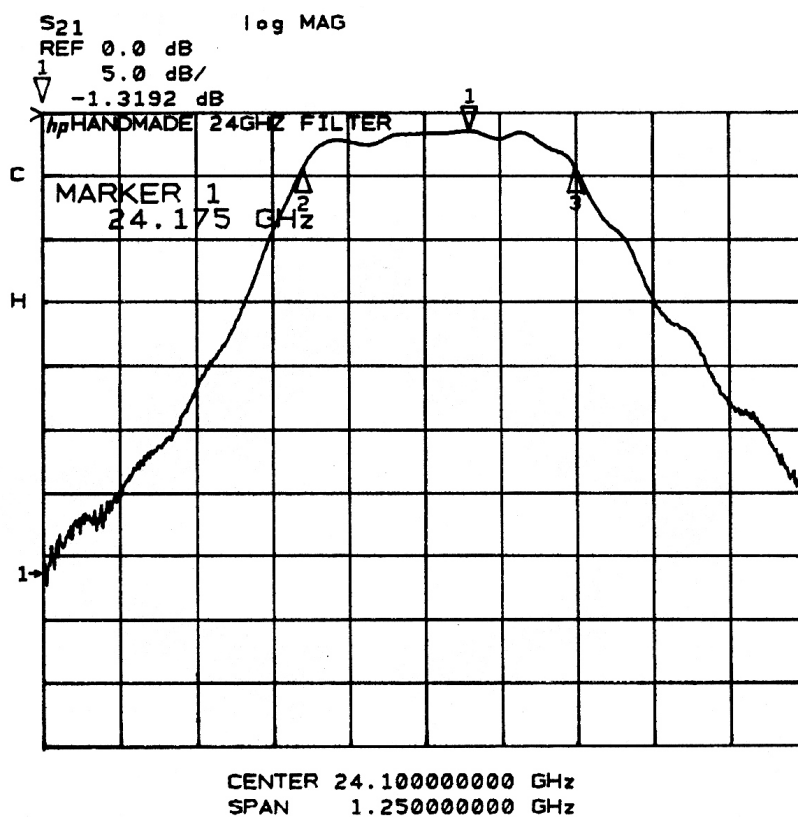


Abbildung 7: Frequenzgangdiagramm des handgefertigten 24-GHz-Filters mit 3 Abschnitten. Die x-Achse ist 125 MHz / Div. zentriert bei 24,1 GHz. Die y-Achse beträgt 5 dB / Div., die Oberseite 0 dB. Die Markierungen 2 und 3 sind die 3 dB-Punkte mit einem Abstand von 441 MHz.