

Stocken von UKW-Antennen in der Praxis

MARTIN STEYER – DK7ZB

Im folgenden Beitrag geht es neben der Vermittlung theoretischer Grundlagen ganz besonders um die praktische Ausführung von gestockten Systemen. Einen Schwerpunkt bildet die messtechnische Überprüfung der Anpassung mit einfachen Mitteln.

Wenn sich der erhoffte Antennengewinn nicht durch die Länge einer Yagi-Antenne allein erreichen lässt, bleibt die Stockung in der Höhe und/oder in der Breite. Dieser Beitrag, der eine überarbeitete Fassung eines Vortrages zur UKW-Tagung Weinheim 2006 darstellt, beleuchtet die dabei zu beachtenden Gegebenheiten.

Theoretische Grundlagen

Allen vorgestellten Anpassschaltungen liegt die Viertelwellen- ($\lambda/4$ -)Transformation mit Koaxialkabeln oder Anpasstöpfen zu Grunde. Das Prinzip geht aus Bild 1 hervor. Eine Viertelwellenleitung mit dem Wellenwiderstand Z transformiert den Betrag der Antennenimpedanz Z_A auf die Eingangsimpedanz Z_E nach der Formel

$$Z_E = Z^2 / Z_A$$

Dabei kann man zwei oder vier Antennen gut zusammenschalten; andere Kombinationen sind denkbar.

Grundsätzlich müssen die Koaxialkabel innerhalb der Antennengruppen nicht nur vom selben Typ sein, sondern auch aus derselben Herstellungs-Charge. Wenn hier

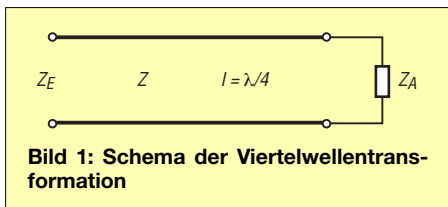


Bild 1: Schema der Viertelwellentransformation

von $\lambda/4$ - oder $\lambda/2$ -Längen die Rede ist, so bezieht sich das auf die Verrechnung des jeweiligen Verkürzungsfaktors VF , der vom Kabeltyp abhängt. In Tabelle 1 sind gängige Kabel, deren Werte für VF sowie notwendige Längen zusammengestellt. Bei den angegebenen Maßen ist die Abschirmung einschließlich eventueller Ste-

cker bei möglichst kurzen Innenleiterstücken gemeint.

Zusammenschalten von zwei Antennen

Hier gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten, die ich nachfolgend vorstelle. Man kann gemäß Bild 2 die beiden Kabel zur Einspeisestelle selbst als Transformationsglieder benutzen, sodass am zusammengeführten Punkt die gewünschten 50Ω direkt zur Verfügung stehen.

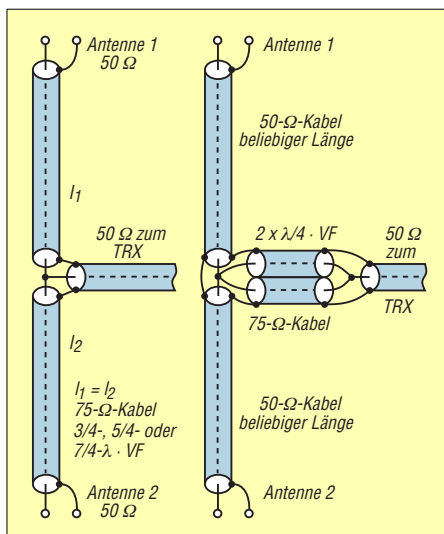


Bild 2: Stockungsmöglichkeit für zwei Antennen
Bild 3: Alternative Stockungsmöglichkeit für zwei Antennen

Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass nur ein verlustarmer Verbindungspunkt auftritt. Der gravierende Nachteil ist, dass sich bei größeren Stockungshöhen mit Längen von $7/4 \lambda$ oder $9/4 \lambda$ mögliche Fehler bei der Längenbemessung vervielfachen und das Kabel anders als gewünscht transformiert. Beispiel: +11,1% Längenab-

weichung sind bei $1 \times \lambda/4$ nicht fatal, machen aber aus $9 \times \lambda/4$ bereits $10 \times \lambda/4$ mit $Z_E = Z_A$. Abhilfe schafft nur elektrisch exaktes Einmessen, siehe unten.

Theoretisch müsste das Kabel einen Wellenwiderstand von $70,6 \Omega$ besitzen, um für jede Leitung am Punkt X einen Wert von 100Ω zu erreichen, der bei Parallelschaltung die gewünschten 50Ω besitzt. Mit handelsüblichem $75\text{-}\Omega$ -Kabel bleibt aber das zusätzliche SWV mit $s < 1,15$ im tragbaren Bereich.

Die beschriebene Fehlervielfältigung wird durch eine andere Methode vermieden, die bis zum Punkt X_1 in Bild 3 beliebige Längen l_1 von $50\text{-}\Omega$ -Kabel benutzt. Diese ergeben durch Parallelschalten an X_1 einen Wert von 25Ω , erfordern aber einen weiteren Verbindungspunkt. Mit einem nur $\lambda/4$ langen Kabelstück l_2 muss dann dieser Wert auf 50Ω bei X_2 gebracht werden, wozu zwei parallele $75\text{-}\Omega$ -Kabel dienen. Theoretisch wären dazu $35,4 \Omega$ nötig, die tatsächlichen $37,5 \Omega$ ergeben die

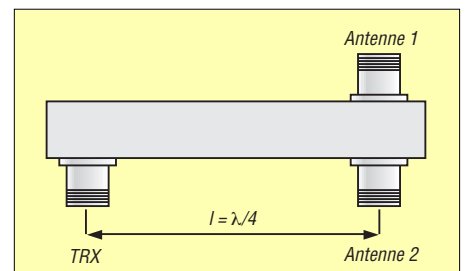


Bild 4: Schema eines Anpasstopfes nach dem Viertelwellenprinzip (Typ 1)

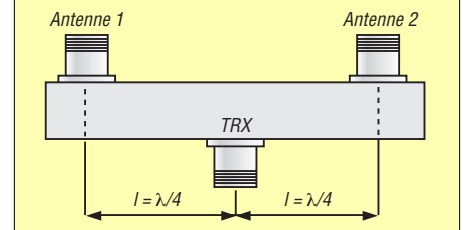


Bild 5: Schema eines Anpasstopfes nach dem Halbwellenprinzip (Typ 2)

gleiche geringfügige Fehlanpassung wie bei der zuvor beschriebenen Anpassungsvariante. Es ist immer sinnvoll, für die Verbindungsstücke Halbwellenlängen zu verwenden, um ungewollte Transformationseffekte zu vermeiden.

Anstelle von l_2 kann auch ein koaxialer Anpasstopf als Zweifach-Verteiler Verwendung finden. Diesen können Sie nach Bild 4 oder Bild 5 aufbauen, Genauers hierzu weiter hinten.

Zusammenschalten von vier Antennen

Zunächst betrachten wir eine Möglichkeit, die bei vier vertikal gestockten Yagis, wie es für Contestbetrieb optimal ist, mit möglichst geringer Dämpfung auskommt. Da-

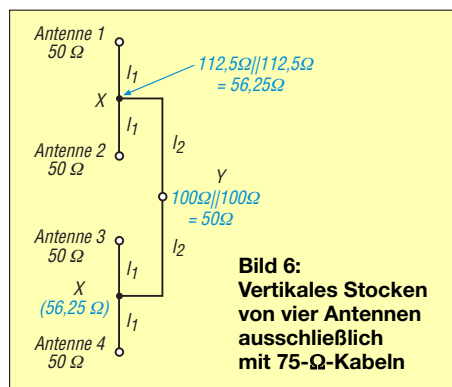
Tabelle 1: Längengstücke für Transformationsleitungen für das 2-m-Band, $f = 144,3 \text{ MHz}$

Kabeltyp	VF	1/4λ	3/4λ	5/4λ	7/4λ	9/4λ
RG213, RG59, RG11	0,66	0,343 m	1,03 m	1,72 m	2,40 m	3,09 m
Teflon RG179, RG188	0,71	0,369 m	1,11 m	1,85 m	2,58 m	3,32 m
H500	0,81	0,421 m	1,26 m	2,10 m	2,95 m	3,79 m
Aircell 7	0,83	0,431 m	1,29 m	2,16 m	3,02 m	3,88 m
PRG-11/CU, H2000Flex	0,85	0,442 m	1,33 m	2,21 m	3,09 m	3,98 m

Zugeschnittene Kabel sind in jedem Fall mit Abschlusswiderständen zu prüfen und eventuell zu korrigieren, siehe Text!

zu werden die notwendigen Längen minimiert und anstelle von 50-Ω-Kabeln solche mit 75 Ω eingesetzt. Ein Vorteil liegt in der physikalisch bedingten, niedrigeren Dämpfung vergleichbarer Kabel. Zudem gibt es häufig sehr gute Kabel aus kommerziellen Beständen. Bild 6 zeigt, wie die Impedanzverhältnisse zu Stande kommen.

Jeweils zwei Antennen werden über 75-Ω-Kabel (l_1) verbunden, die aus Längen von ungeradzahlig Vielfachen von $\lambda/4$ bestehen. Sie transformieren auf 112,5 Ω an den Punkten X. Dort ergibt sich durch Parallelschalten ein Impedanzwert von 56,25 Ω.



Nun transformieren wieder zwei 75-Ω-Kabel mit der Länge l_2 auf 100 Ω am Punkt Y, an dem sich wiederum durch Parallelschaltung der Widerstandswert halbiert und die erwünschten 50 Ω anstehen. Für diese Anpassung bietet sich der Kabeltyp PRG11/CU an, der Vergleichstyp zum bekannten H-500 mit 50 Ω. Nach dieser Methode hat auch DH7FB seine ferngesteuerte 4 × 12-Element-EME-Gruppe [1] zusammengeschaltet, Einzelheiten dazu finden sich ferner in [2].

Alternativ lassen sich 50-Ω-Kabel verwenden. Dies ist für vertikale und H-Anordnungen möglich. Dann sind nach Bild 7 die Längen l_1 aus beliebig langen 50-Ω-Stücken und an X ergeben sich 25 Ω. Für l_2 muss man dann wieder Viertelwellenstücke zum Transformieren auf 100 Ω an Y verwenden, die den gewünschten Anschlusswert von 50 Ω ergeben.

Als beste Lösung für ein H-Kreuz bietet sich eine Konfiguration an, die für l_2 nur mit zwei $\lambda/4$ langen Kabelstücken auskommt, deren Länge exakt stimmen muss. In Bild 8 sind die Abschnitte l_1 jeweils

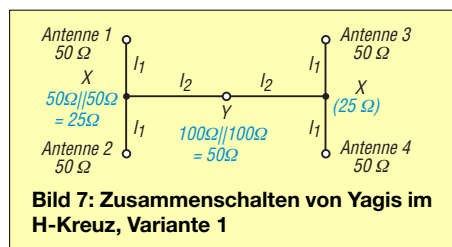


Tabelle 2: Durchmesser für koaxiale Anpasstöpfe nach den Bildern 4 und 5. Angaben für D (Innendurchmesser quadratischer Außenleiter) und d (Außendurchmesser runder Innenleiter)

Koppler-Typ	Z_L gefordert	f/MHz	l/mm	D/mm	d/mm	Z_L tatsächlich
2-Weg Typ 1	35,4 Ω	144	500	26	15	37,5 Ω
2-Weg Typ 1	35,4 Ω	432	166	26	15	37,5 Ω
2-Weg Typ 2	70,7 Ω	432	166	17	6,0	65,9 Ω
2-Weg Typ 2	70,7 Ω	432	166	17	5,5	71,2 Ω
4-Weg Typ 2	50,0 Ω	144	500	21	10	49,0 Ω
4-Weg Typ 2	50,0 Ω	432	166	21	10	49,0 Ω

exakt gleichlange 50-Ω-Kabel, optimal wieder mit $\lambda/2$ -Vielfachen, und l_2 ebenfalls 50-Ω-Kabel mit einer Viertelwellenlänge. Es empfiehlt sich, die Stücke l_2 nur jeweils $1 \times \lambda/4$ lang zu machen und dafür l_1 zu verlängern, auch wenn das etwas mehr Kabel erfordert.

■ Aufbau von Anpasstöpfen

Hierbei nutzt man das Prinzip, dass ein System aus einem Innen- und Außenleiter gemäß Bild 9 einen definierten Wellenwiderstand Z besitzt, der von den inneren und äußeren Durchmessern D und d abhängt. Dabei ist es ohne Bedeutung, ob die beiden Querschnitte rund oder quadratisch sind. Aus praktischen Gründen empfiehlt es sich allerdings, den Außenleiter quadratisch und den Innenleiter rund auszuführen, weil die Montage von Koaxialbuchsen so problemlos möglich ist.

Dazu benutzt man Aluminium-Vierkantrohre mit $30 \times 2 \text{ mm}^2$, $25 \times 2 \text{ mm}^2$ oder $20 \times 1,5 \text{ mm}^2$, die Innenmaße von 26 mm, 21 mm und 17 mm ergeben.

Für den Innenleiter aus Rundmaterial bieten sich Aluminium- oder Kupferrohre an. Messing sollte vermieden werden, weil es eine deutlich schlechtere Leitfähigkeit aufweist. Das Verhältnis D/d bestimmt den Wellenwiderstand der Anordnung. Dieser lässt sich nach LA0BY [3] mit folgender Näherungsformel bestimmen:

$$Z_L = 138 \cdot \log_{10} (D/d) + 6,48 - 2,34 \cdot A - 0,48 \cdot B - 0,12 \cdot C$$

Dabei sind A, B und C definiert als:

$$A = (1 + 0,405/(D/d)^4) / (1 - 0,405/(D/d)^4)$$

$$B = (1 + 0,163/(D/d)^8) / (1 - 0,163/(D/d)^8)$$

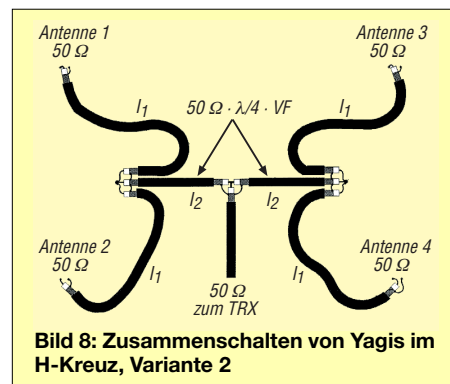
$$C = (1 + 0,067/(D/d)^{12}) / (1 - 0,067/(D/d)^{12})$$

Die errechneten Maße müssen relativ genau eingehalten werden, leider haben handelsübliche Rohre und Profile meist nicht die richtigen Durchmesser. Hervorragend geeignet für die Berechnung ist das kostenlos erhältliche Programm AppCAD [4], siehe ausführliche Beschreibung in [5]. Es enthält eine Fülle von für den HF-, UKW- und Mikrowellen-Amateur nützlichen Berechnungsunterlagen. Darunter befinden sich auch die Konstruktionsgrundlagen für Viertelwellenanpass-

töpfe mit quadratischem Außenleiter und rundem Innenleiter.

Berechnet wird nach Vorgabe der mechanischen Maße der Wellenwiderstand. Es lassen sich jedoch auch der Wellenwiderstand und der Außenleiter vorgeben, dann kommt der Durchmesser des Innenleiters heraus.

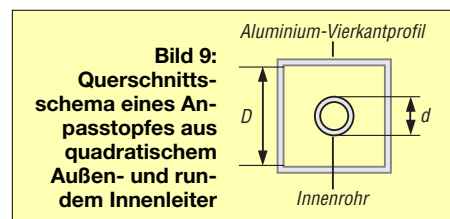
Bild 10 zeigt einen Screenshot dieses exzellenten Werkzeugs. Hier sind die Werte für einen Wellenwiderstand von 25 Ω für 144,3 MHz zu erkennen.



Die beschriebenen Anpasstöpfe wurden nach den AppCAD-Maßen gebaut, sie erwiesen sich als voll gebrauchsfähig. Gegenüber den LA0BY-Angaben weichen sie geringfügig ab.

Anstelle der Zweifach-Töpfe kann man auch vierfache bauen, dann befinden sich jeweils weitere Buchsen an den Enden. Bei längeren Maßen ist eine quadratische Epoxy-Platte hilfreich, die über das Innenrohr geschoben wird und für dieses eine mechanische Entlastung in der Rohrmitte ergibt. Der Tabelle 2 sind der geforderte und der tatsächliche Wellenwiderstand zu entnehmen.

Wie Sie ein Aluminiumrohr anschließen können, ist in Bild 11 zu erkennen. Eine M3-Schraube nebst Mutter hält zwei versilberte Lötösen, die den Kontakt mit dem Mittelstiften der beiden N-Buchsen herstellen.



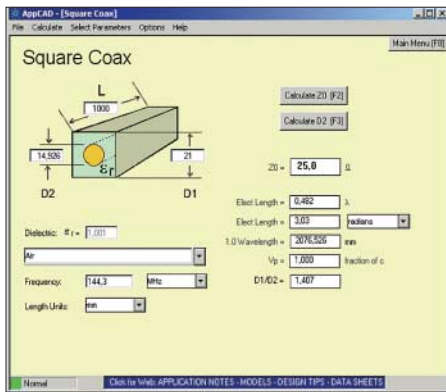


Bild 10: Screenshot des Programms AppCad für die Berechnung von Anpasstöpfen

Bild 11 dient zugleich als Beispiel für einen Vierfach-Topf vom Typ 2. Hier habe ich ein Aluminium-Vierkantrohr $25 \times 25 \times 2 \text{ mm}^3$ mit dem Innenmaß von 21 mm mit einem 10-mm-Alurohr kombiniert, was einen Wellenwiderstand von 25Ω ergibt. Das gemessene SWV dieses Topfes bei 144,3 MHz und Abschluss mit R&S-Messwiderständen ist $s = 1,0$.



Bild 11: Anschluss eines Aluminium-Innenrohres an die Koaxialbuchsen

Die Zweifach-Töpfe vom Typ 1 haben mit 15-mm-Kupferrohren aus dem Heizungsbau als Innenleiter auf 432 MHz eine Bandbreite von $\pm 10 \text{ MHz}$ mit einem SWV von $s = 1,1$, bei 144,3 MHz von $s = 1,0$. Hier gibt es einen Trick, mit dem sich die Anpassung verbessern lässt. Wie aus Tabelle 1 hervorgeht, liegt der errechnete Wellenwiderstand 2Ω über dem geforderten von $35,4 \Omega$. Nähert man auf einer Seite das Innenrohr etwas mehr einer Seite an, so lässt sich die Rückflussdämpfung weiter verbessern, weil dadurch der Wellenwiderstand etwas absinkt. Dies empfiehlt sich aber nur, wenn exakte Messmittel zur Verfügung stehen.

Normalerweise kommt man allerdings beim Einhalten der gegebenen Maße mit 10-mm- bzw. 15-mm-Innenrohren immer auf Anhub ohne Abgleich auf die geforderten Werte, sodass selbst handwerklich weniger geschickte Amateure solche An-



Bild 12: 2-m-Anpasstopf für vier Antennen nach dem Halbwellenprinzip

passtöpfe bauen können. Vierkant-Stopfen, wie sie im Baumarkt als Abschluss für Tischbeine erhältlich sind, dienen als Abschluss der offenen Enden.

■ Preisgünstige Anpasstöpfe

Wer handwerklich weniger Aufwand treiben möchte und trotzdem zu guten Ergebnissen kommen will, kann die beschriebenen $1/4\text{-}\lambda$ -Koaxialkabel-Leitungen in Vierkantrohren unterbringen. So gelangt man ebenfalls zu sauberen, kurzen Masseverbindungen und einer stabilen Montagefläche für die Koaxialbuchsen. Dabei sind die Abschirmungen vor dem Einbau mit Lötösen zu verbinden, diese werden dann im Rohr verschraubt. Dazu reichen einfache Lötverbindungen aus, die sich mit einem 30-W-Lötcolben ausführen lassen. Beim Vergleich mit Bild 3 wird deutlich, was damit gemeint ist. Hier kann man das parallelgeschaltete Transformationsstück aus den $75\text{-}\Omega$ -Kabeln in einem Aluminium-Vierkantrohr unterbringen. Damit ist das zusätzliche SWV mit $s = 1,15$ auf 2 m und 70 cm immer noch im tragbaren Bereich. Ein Vorteil ist neben einer soliden Mechanik ein mechanisch merklich verkürzter Topf.

■ Überprüfen der Anpassung

Selbstverständliche Voraussetzung ist eine Überprüfung der Anpassung jeder einzelnen Antenne vor dem Zusammenschalten zu Gruppen. Dazu sollten zunächst die Transformationskabel zusammengeschaltet und anstelle der Antennen mit induktionsarmen $50\text{-}\Omega$ -Abschlusswiderständen versehen werden. Als Beispiele können zwei Ausführungen mit BNC- und N-Buchsen dienen (Bilder 13 und 14). Dabei sind sechs $300\text{-}\Omega$ -Metallschichtwiderstände [6] mit je $0,25 \text{ W}$ Belastbarkeit und 1% Toleranz mit möglichst kurzen Anschlüssen parallelgeschaltet. So ergibt sich für 2 m ein SWV von $s = 1,0$, bei 70 cm $s < 1,1$ für jeden Widerstandsigel. Entsprechende Abschlusswiderstände lassen sich natürlich auch in Koaxial-Steckern unterbringen, um Töpfe mit Buchsen-Anschlüssen zu überprüfen.

Bei Messungen an Anpassgliedern und Antennen sollten immer Kabel mit Längen von Vielfachen einer Halbwellenlänge eingesetzt werden. Veranschaulichen wir uns an einem Beispiel, was passieren kann, wenn man darauf nicht achtet: Weist das Speisekabel zufällig eine Länge auf, die



Bild 13: Selbstgebaute $50\text{-}\Omega$ -Abschlusswiderstände mit N-Buchse



**Bild 14: Abschlusswiderstände auf BNC-Basis
Fotos und Screenshot: DK7ZB**

dem ungeradzahligen Vielfachen von $\lambda/4$ entspricht, so tritt bei einer tatsächlichen Impedanz von 45Ω ein Messergebnis von 55Ω auf! Derlei Verfälschungen am Ende von Speisekabeln durch Transformations-effekte sollte man immer berücksichtigen.

Durch Messen der Anpassung auch oberhalb und unterhalb der jeweiligen Bänder lässt sich schnell herausfinden, ob die Längen stimmen. Gegebenenfalls sind die Kabel entsprechend zu korrigieren.

Es ist möglich, einzelne Antennen in einer Gruppe durch die beschriebenen $50\text{-}\Omega$ -Widerstände zu ersetzen. Damit findet man im Zweifelsfall schnell heraus, an welcher Stelle eine mögliche Fehlanpassung ihren Ursprung hat.

Vor dem Aufbau der Antennenanlage empfiehlt es sich daher immer – neben der selbstverständlichen Prüfung der Einzelantennen – alle Kabel und Steckverbindungen einem entsprechendem Test zu unterziehen.

dk7zb@fox28.de

Literatur und Bezugsquellen

- [1] Bosse, F., DH7FB: Portabel-QTH an der langen Leine. FUNKAMATEUR 54 (2005) H. 5, S. 454-457
- [2] Bosse, F., DH7FB: DH7FB/p – HAMstation remote controlled. www.dh7fb.de
- [3] Heck, S., LA0BY: Antenna couplers for 144 and 432 MHz. www.mydarc.de/la0by/Antenna_couplers.doc
- [4] Agilent Technologies: Programm AppCAD 3.0.2. www.hp.woodshot.com
- [5] Kleinsorge, M., DJ5QX; Hegewald, W., DL2RD: AppCAD V3.0.2 – der kleine Helfer für alle Fälle. In: Hegewald, W., DL2RD (Hrsg.): Software für Funkamateure (2). Box 73 Amateurfunkservice GmbH, Berlin 2006; S. 67-76; Software auf CD-ROM mitgeliefert; FA X-9346
- [6] Reichelt Elektronik: Tel. (0 44 22) 95 53 33, www.reichelt.de