

Dimensionierung und Vergleich von Pi- und T-Koppler

Pi- und T-Koppler gehören zu den wohl bekanntesten Tunern, die der Funkamateurl zur Anpassung seiner Endstufe an die unterschiedlichsten Antennen verwendet.

Beide Kopplertypen bestehen aus jeweils zwei abstimmbaren Kapazitäten und einer abstimmbaren Induktivität.

Das Tool berechnet (unter Vernachlässigung der Verluste in L und C) bei gegebener Eingangs-impedanz des Antennenkabels die verschiedensten Einstellungen zur Erzielung eines Stehwellenverhältnisses von 1,0 und ermöglicht aufschlussreiche Vergleiche zwischen beiden Kopplertypen.

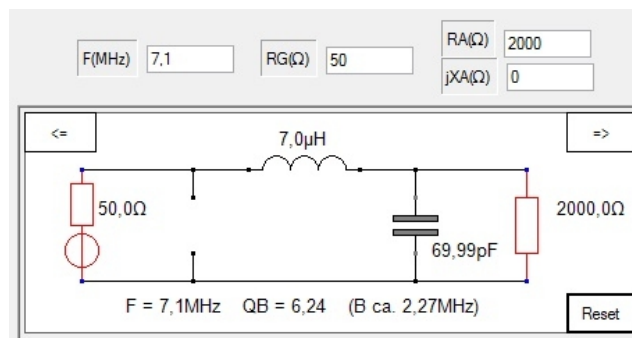
Beispiel 1:

Ein endgespeister Halbwellenstrahler für das 40m-Band hat bei 7,1MHz eine reelle Eingangsimpedanz $R_A = 2000\Omega$.

Welche Werte müsste ein direkt am Antennenfußpunkt angeschlossenes Pi-Glied haben, um beste Anpassung an das 50 Ω -Speisekabel zu erzielen?

Nach Eingabe der Daten klicken Sie so lange auf "<=" in der linken oberen Ecke der Pi-Schaltung bis sich die LC-Werte nicht mehr ändern.

In diesem Fall hat die Betriebsgüte ihren geringstmöglichen Wert erreicht und das Pi-Glied ist zu einem LC-Halbglied (Tiefpass) entartet. Dies verspricht maximale Breitbandigkeit bei gleichzeitig geringstmöglichen Anpassungsverlusten.



Mittels ">=" -Schaltfläche wird schrittweise die Betriebsgüte erhöht.

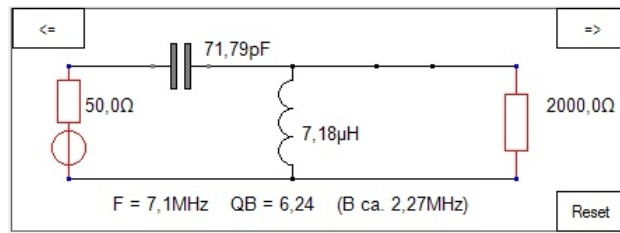
Dies bedeutet zwar bessere Selektionseigenschaften, gleichzeitig vergrößern sich aber auch die Anpassungsverluste.

Da moderne Endstufen bereits über gute Oberwellenfilter verfügen, ist eine hohe Betriebsgüte des Kopplers weder notwendig noch erstrebenswert, die Optimierung folgt deshalb i.d.R. dem Kriterium der geringsten Anpassungsverluste.

Beispiel 2:

Das Vorgängerbeispiel soll als T-Glied realisiert werden.

Bei gleicher Vorgehensweise, nur diesmal auf der rechten Seite, ergibt sich folgende optimale Lösung:



Man erkennt, dass auch hier das T-Glied zu einem Halbglied (Hochpass) entartet ist, dessen Schaltelemente und dessen Betriebsgüte etwa denen des Vorgängerbeispiels entsprechen.

Interessant, allerdings für andere Zwecke, wäre auch eine Zusammenschaltung beider Lösungen an der 2000-Ohm-Seite zur Realisierung eines verlustarmen Bandpasses mit beidseitigem 50Ohm-Abschluss.

Beispiel 3:

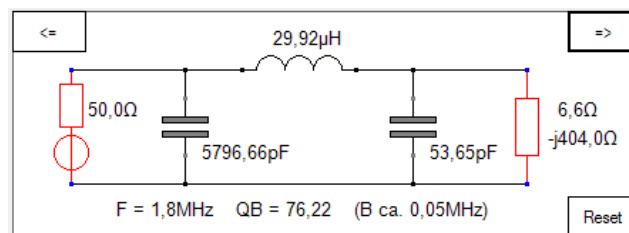
Am Eingang der Speiseleitung eines für den 1,8MHz-Betrieb stark verkürzten Dipols messen wir mit einem VNA die Impedanz $Z_a(\text{Ohm}) = 6,6 - j404$.

Für unseren Koppler stehen eine 30µH-Rollspule und zwei 100pF-Drehkos zur Verfügung.

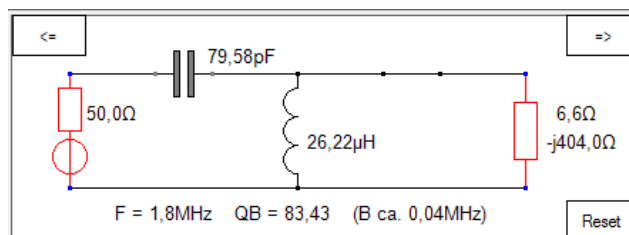
Welcher Kopplertyp (Pi oder T) wäre besser geeignet?

Beim Pi-Koppler erhalten wir nach dem "Reset" und wiederholtem Klick auf ">=" für C2 zunächst nur negative Werte (d.h., C2 müsste eigentlich eine Induktivität sein). Nach weiterer Erhöhung von QB kommen wir zwar für C2 irgendwann in den positiven Bereich, die Grenzwerte für L und C1 lassen sich aber mit den zur Verfügung stehenden Bauelementen nicht gemeinsam einhalten.

So ist zwar bei der folgenden Lösung L gerade noch am Limit, C1 ist aber immer noch viel zu groß:



Ein Aufbau als T-Koppler wäre jedoch problemlos möglich, womit eindeutig die Entscheidung zugunsten dieser Variante gefallen ist:



Zu beachten ist allerdings auch hier die relative Schmalbandigkeit (3dB-Bandbreite nur 40kHz), die auch innerhalb des Bands ein öfteres Nachstimmen erfordert.

Zur Theorie

Die pro Band unterschiedlichen komplexen Impedanzen Z_A am senderseitigen Eingang des Speisekabels müssen an den realen 50 Ohm-Ausgang der PA transformiert werden. Das geht nur mit einem Anpassnetzwerk (Antennenkoppler), in welchem die Blindwiderstände jX_A kompensiert und die realen Wirkwiderstände R_A transformiert werden. Man spricht daher auch von einer „konjugiert komplexen Anpassung“.

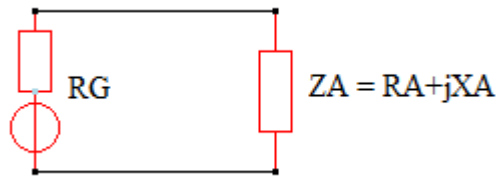
Die Leistungsanpassung eines Generators (PA) mit dem Innenwiderstand R_G an einen Verbraucher (Antenne) mit dem komplexen Widerstand Z_A ist dann erreicht wenn gilt $Z_A = R_G$ (siehe [Leistungsanpassung](#)).

In diesem Fall wird an Z_A die maximal verfügbare Generatorleistung umgesetzt (bei einer 100W-PA sind das 100W) und ein SWV=1,0 am PA-Ausgang ist erreicht.

Bei der Anpassung von nicht abgestimmten Antennen ist die Bedingung $Z_A = 50\text{Ohm}$ in der Regel nicht einzuhalten, da deren Fußpunktimpedanz zusätzlich noch durch das Speisekabel transformiert wird und die PA in der Regel eine komplexe Lastimpedanz "sieht":

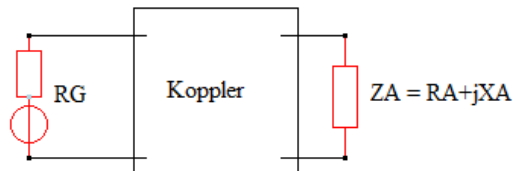
$$Z_A = R_A + jX_A$$

mit $R_A \neq R_G$ und $X_A \neq 0$.



Das Anpassglied (der Koppler) hat deshalb zwei Aufgaben zu erfüllen:

1. Transformation der reellen Komponente der Lastimpedanz Z_a auf den Wert von R_i (50Ohm).
2. Kompensation der Blindkomponente jX_a auf den Wert 0 durch Einfügen eines konjugiert komplexen L bzw. C mit dem Wert $-jX_a$.



Während die Berechnung von CLC-Pi-Kopplern (Collinsfilter) bereits ausgiebig in der einschlägigen Literatur verankert ist, trifft das auf CLC-T-Koppler weniger zu. Letztere waren aufgrund ihres Hochpass-Charakters lange verpönt, haben aber jetzt wieder an Bedeutung zugenommen, da die Aufgabe der Oberwellenunterdrückung meist von vorgeschalteten 50Ohm-Filterketten übernommen wird, die in jeder modernen PA integriert sind.

Das von mir entwickelte Tool "Pi- vs T-Koppler" erleichtert den Vergleich beider komplementärer Kopplertypen, die bezüglich ihres materiellen Aufwands nahezu gleichwertig sind. Für den Selbstbauer hängt die Entscheidung letztendlich vom Wertebereich der verfügbaren Bauelemente und vom Umfang des abstimmbaren Impedanzbereichs ab.

Für die abschließende Beurteilung (Selektionskurve, Wärmeverluste und Spannungen) leistet mein Netzwerkanalyseprogramm *HamVNAS* gute Dienste.