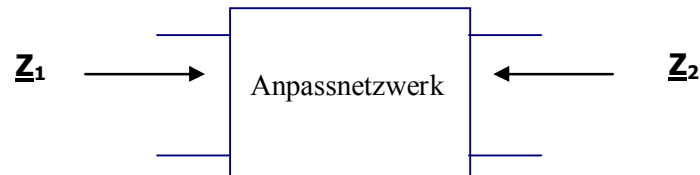


Das Collins-Filter mit Verlusten

**Mitteilungen aus dem Institut
für Umwelttechnik
Nonnweiler - Saar
Dr. Schau
DL3LH**

Vorwort:

Einer sinusförmigen Quelle mit der Innenimpedanz \underline{Z}_1 und der Lastimpedanz \underline{Z}_2 kann maximale Leistung entnommen werden, wenn $\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2^*$ gilt. Bei beliebiger Lastimpedanz \underline{Z}_2 muss zwischen Quelle und Lastimpedanz ein Anpassnetzwerk (APN) geschaltet werden, das die Aufgabe der Transformation von \underline{Z}_1 auf \underline{Z}_2 übernimmt und als Impedanzpuffer fungiert.



Ein APN muss immer zwei Bedingungen erfüllen: Resonanz und Transformation. Resonanz bedeutet Kompensation der Blindanteile, Transformation die Gleichheit der Realteile. Da das PI-Filter drei Blindelemente hat, ist somit ein Element frei wählbar – meistens wird die Güte als Parameter gewählt.

Reale Spulen und Kondensatoren haben Verluste die zur Erwärmung dieser Bauteile führen. Der Verlust einer realen Kapazität berechnet sich zu $P_v = U^2 \omega C \tan(\delta)$. Bei kleinen Verlustwinkeln δ ist der $\tan(\delta)$ gleich dem Argument $\tan(\delta) \approx \delta$ und wird d genannt, wobei $d = 1/Q_c$ ist. U ist der Effektivwert der Kondensator-Spannung. Die Güten guter Kondensatoren sind so hoch, dass der Verlust einer realen Kapazität im APN meist vernachlässigt werden kann.

Der Verlust einer Induktivität berechnet sich zu $P_v = I^2 \omega L \tan(\delta)$. Bei kleinen Verlustwinkeln δ gilt wieder $\delta \approx d = 1/Q_L$, I ist der Effektivwert des Spulenstromes. Der Verlust einer realen Induktivität ist nicht vernachlässigbar und wird nur durch eine hohe Spulengüte klein gehalten.

Der Gesamtverlust einer APS wird durch die Güten der Bauteile und den am Ein- und Ausgang vorhandenen Impedanzen \underline{Z}_1 und \underline{Z}_2 bestimmt. Bei bekannten Impedanzen \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 ist die Betriebsgüte eine feste Größe und bestimmt damit die Bandbreite der APS.

1. Das Pi-Filter mit Verlusten

Zur Verbesserung der Dämpfung von Oberschwingungen wird gerne das Collins- oder Pi-Filter mit 3 Elementen verwendet. Das typische Pi-Filter zeigt das Bild 1.1. Es setzt sich aus der Reihenschaltung eines CL- und einem LC-Gliedes zusammen. Die Eingangsimpedanz ist bei tiefen Frequenzen kapazitiv, gefolgt von einer Serienresonanz und einer Parallelresonanz. Die Serienresonanz liegt also immer unterhalb der Parallelresonanz. Bei hohen Frequenzen wird die Eingangsimpedanz niederohmig und ist praktisch ein Kurzschluss. Die Serienresonanz ist bei einer niederohmigen Lasten meist wenig ausgeprägt und manchmal überhaupt nicht zu merken. Bei hochohmigen Lasten allerdings kann diese Parallelresonanz störend wirken und die Abstimmung unübersichtlich machen. Sind induktive Lasten vorhanden wird die Gesamtanordnung zu einem Bandfilter mit weiteren Resonanzen.

Mit 3 Blindelementen hat das Pi-Filter 3 Freiheitsgrade. Es gibt also unendlich viele Kombinationen von L und C für die Abstimmung. Der Vorteil ist die Wählbarkeit der Güte Q_B , allerdings nur in einem gewissen Rahmen. Damit Resonanz und Transformation nur 2 Bedingungen vorliegen, kann die Güte als Freiheitsgrad angesehen werden. Allerdings gibt es beim Pi-Filter „verbotene“ Bereiche, in denen eine Transformation nicht möglich ist (siehe Tabelle unten).

Daher hat das Pi-Filter nur *scheinbar* einen Freiheitsgrad. Unter der Nebenbedingung geringer Verluste ist die dritte „freie“ Größe nicht frei wählbar. Um die Verluste gering zu halten muss die Leerlaufgüte möglichst hoch, die Betriebsgüte aber möglichst gering sein. Das wird durch eine kleine antennenseitige Kapazität erreicht.

Bezeichnet man den Quellwiderstand mit R_1 und den Lastwiderstand mit R_2 , dann ergeben sich für das verlustlose Pi-Filter folgende, einfache Gleichungen

$$X_{c1} = R_1 / Q \quad (\text{Gl.1.1})$$

$$X_{c2} = R_2 \sqrt{(R_1/R_2) / (Q^2 + 1 - R_1/R_2)} \quad (\text{Gl.1.2})$$

$$X_L = [(Q * R_1 + R_1 * R_2 / X_{c2}) / (Q^2 + 1)] \quad (\text{Gl.1.3})$$

Aus (Gl.1.2) ist ersichtlich, dass die Güte immer größer sein muss als

$$Q > \sqrt{(R_1 / R_2) - 1} \quad (\text{Gl.1.4})$$

Beispiel 1.1

Eine Endstufe hat bei der Frequenz von $f_0 = 3,6 \text{ MHz}$ einen Innenwiderstand von $R_1 = 1200 \ \Omega$ der mit einem Pi-Filter auf $R_2 = 50 \ \Omega$ angepasst werden soll.

Aus (Gl.1.4) ergibt sich die Bedingung für die Betriebsgüte Q

$$Q > \sqrt{1200/50 - 1} = 4.8$$

d.h. die Güte muss größer 4.8 sein. Wir wählen eine Güte von $Q = 5$.

Das Verhältnis von R_1 zu R_2 ist $1200 / 50 = 24$. Es berechnet sich nach (Gl.1.1 bis 1.3)

$$X_{c1} = 1200 \ \Omega / 5 = 240 \ \Omega, \quad X_{c2} = 173.21 \ \Omega, \quad X_L = 244.09 \ \Omega$$

und bei der Frequenz $f_0 = 3,6 \text{ MHz}$ die Kapazitäten und Induktivitäten

$$C_1 = 184,2 \text{ pF}, \quad C_2 = 255,24 \text{ pF} \quad \text{und} \quad L = 10,79 \ \mu\text{H}.$$

Die zugehörige Schaltung zeigt das Bild 1.1

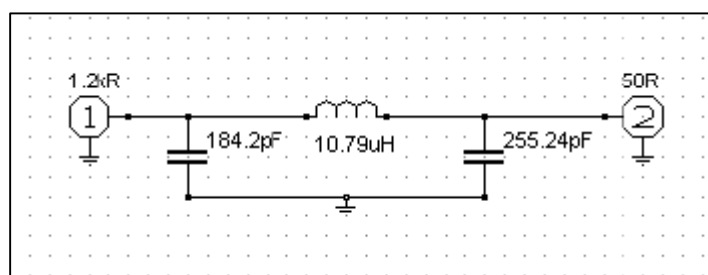


Bild 1.1:

Das Bild 1.2/ 1.3 zeigt den Betrag des Eingangsreflexionsfaktors (rot), die Übertragungsfunktion (blau) und im Smith-Diagramm den Verlauf der Eingangsimpedanz zwischen $f = 1$ bis 10 MHz für das berechnete Beispiel 1.1.

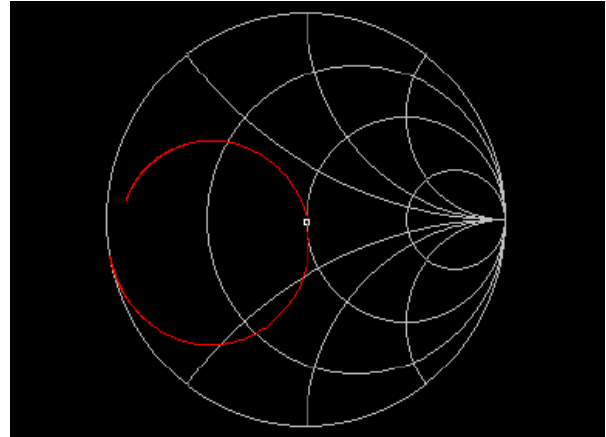
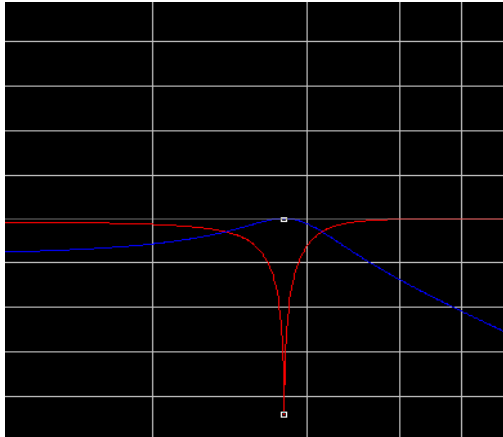


Bild: 1.2 und 1.3

Für eine Transformation auf eine konstante Last von $R_2 = 50 \Omega$ ist die Tabelle 1.1 eine erste Hilfe – man braucht nicht rechnen. Die Tabelle zeigt die maximalen und minimalen Widerstände R , die als Funktion der Güten des Pi-Filters überhaupt auf 50Ω transformiert werden können. Will man von 50Ω auf einen anderen Wert reellen transformieren ist Eingang und Ausgang zu tauschen. Beim Pi-Filter tauschen die Blindelemente ihren Platz.

Die Berechnung der Elemente des verlustlosen Pi – Filters reicht für Amateurzwecke völlig aus. Man braucht nicht die komplexen und unübersichtlichen Formeln für das verlustbehaftete Filter durch die mathematische Mühle drehen.

Beispiel 1.2

Mit einer Güte von $Q = 4$ ist der minimale Widerstand $R_{1,\min} = 25 \Omega$ oder der maximal mögliche Widerstand $R_{1,\max} = 800 \Omega$ der auf 50Ω transformiert kann. Darüber und darunter ist eine Transformation mit der Güte 4 nicht möglich (siehe verbotene Bereiche).

Q	R, min Ω	R, max Ω	Xc1 Ω	Xc2 Ω	X _L Ω
1		90	90	150	60
1	1		1	5.03	5.47
2		225	112.5	150	105
2	1		0.5	3.17	3.56
3		250	83.33	50	100
3	1		0.33	2.24	2.53
4		800	200	200	200
4	25		6.25	8.7	14.33
5		1200	240	173.21	244.09
5	1		0.2	1.39	1.58
6		1800	300	300	300
6	1		0.17	1.16	1.32
7		2400	342.86	244.95	345.8
7	1		0.14	1	1.14
8		2400	300	84.02	317.36
8	1		0.13	0.88	1
9		2400	266.67	59.41	288.05
9	75		8.33	6.83	14.93
10		2400	240	47.58	262.59
10	1		0.1	0.7	0.8
12		6000	500	109.54	514.44
12	300		25	10.39	34.79
14		6000	428.57	62.42	450.79
14	300		21.43	8.86	29.91
16		6000	375	46.8	398.49
16	300		18.75	7.73	26.23
18		6000	333.33	38.25	356.44
18	300		16.67	6.86	23.35
20		6000	300	32.27	322.15
20	300		15	6.16	21.03

Tab. 1.1: Pi - Filter mit minimalem und maximalem Widerständen als Funktion der Güte Q

Die Literatur und das Netz sind voll von Berechnungen des Pi-Filters und gehen fast immer von verlustlosen Blindelementen aus. Unter Vorgabe der Betriebsgüte, die im verlustlosen Fall nur von der Außenbeschaltung abhängt, werden Güten von 10 bis 15 empfohlen, viel zu hoch. Denn hohe Betriebsgüten haben immer hohe Ströme in der Induktivität zur Folge und damit hohe Verluste. Das Pi-Filter mit 3 Blindelementen hat also nur *scheinbar* einen Freiheitsgrad. Unter der Nebenbedingung geringer Verluste ist die dritte, „freie“ Größe nicht frei wählbar.

Wie ist ein Pi-Filter für möglichst geringe Verluste zu dimensionieren? Mit einigermaßen Sachverstand kann man schon alleine durch einfache Sichtung der Schaltung herausfinden, dass ein hoher Kapazitätswert die HF mehr und mehr kurzschließt, d.h. ein Großteil der HF verbleibt in der Anpassschaltung und führt zur Erwärmung der Bauteile und manchmal zur Zerstörung.

Ein Pi-Filter im Anodenkreis einer Endstufe mit einer großen Kapazität auf der Ausgangsseite muss immer höhere Verluste haben, als ein Filter mit kleiner Ausgangskapazität, da ein Großteil der HF gegen Masse „abgeklatscht“ wird. Nur hier im Anodenkreis ist das Pi-Filter wegen der Stromsteuerung durch die Röhre zwingend notwendig und geht durch einfache Umzeichnung aus dem Parallelkreis hervor.

Das Pi-Filter wird auch hinter Sendereinstufen als Anpassschaltung verwendet. Die Eingangsimpedanz ist dann die Systemimpedanz, meist 50 Ω . Auch hier ist die Schaltung mit der kleineren Ausgangskapazität immer die verlustärmere Lösung. Der Grenzwert einer fehlenden Ausgangskapazität ist dann logischerweise ein Anpassnetzwerk mit 2 Elementen, die immer weniger Verluste hat, als ein APN mit 3 Elementen.

Ganz allgemein gilt, dass Wärmeentwicklung immer ein sicheres Zeichen für eine falsche Dimensionierung ist. Ganz verlustarm und daher vorzuziehen ist ein APN nur aus Kondensatoren – also keine Induktivität. Dazu muss aber die Lastimpedanz Z_L induktiv sein und der Realteil kleiner als die Quellimpedanz, was meist durch die Wahl der Zuleitungslänge zur Antenne erreicht werden kann – allerdings nicht für alle Bänder.

Geht man bei der Berechnung eines Pi-Filters z.B. in einer Röhren-Endstufe in einfacher Weise von einem reellem Innenwiderstand der Leistungsendröhre von 2000 Ω aus und berechnet die Transformation auf 50 Ω , ergeben sich mit einer Rechenleistung von $P = 1000$ W, den Güten $Q_L = 100$, $Q_c = 500$ und der Frequenz von $f = 3,6$ MHz die Werte nach Tab. 1.2

Frequenz in MHz	C_2 pF	L μ H	C_1 pF	Verlust in der Induktivität W	Leistung an der 50 Ω Last W	Betriebsgüte des Filters Q	Verlust des Collins-Filters gesamt %
3.6	100	14.49	133.7	62	926.2	6.2	7.4
3.6	200	14.48	136.1	64	923.6	6.4	7.6
3.6	300	14.30	140.0	66	920.2	6.7	8.0
3.6	400	13.98	145.3	70	916.1	7.0	8.4
3.6	500	13.55	151.9	74	911.4	7.4	8.9
3.6	600	13.06	159.5	78	906.0	7.9	9.4
3.6	700	12.52	167.9	83	900.3	8.4	10.0
3.6	800	11.97	177.1	88	894.1	8.9	10.6
3.6	900	11.42	186.9	94	887.7	9.5	11.2
3.6	1000	10.89	197.1	99	881.0	10.0	11.9
3.6	1500	8.65	252.5	129	845.7	13.1	15.4
3.6	2000	7.08	310.6	159	809.4	16.3	19.1
3.6	2500	5.98	386.4	189	773.7	19.5	22.6
3.6	3000	5.19	424.9	217	739.2	22.6	26.1
3.6	5000	3.48	630.1	320	616.2	34.2	38.4

Tab. 1.2:

Aus Tab. 1.2 ist ersichtlich, dass die Schaltung mit der kleineren Ausgangskapazität C_2 die geringeren Verluste hat. Der Grenzwert für geringste Verluste ist $C_2 = 0$. Wir haben eine 2-Element Anpassschaltung vor uns. Die Daten in Tab. 1.2 sind mit einer Spulengüte von $Q = 100$ berechnet. Wird nur eine Spulengüte von $Q = 50$ erreicht, verdoppeln sich die Verluste in der Induktivität.

Beim Pi-Filter gibt es „Verbotene Bereiche“, in denen das Pi-Filter seine Aufgabe nicht erfüllen kann. Um die verbotenen Bereiche zu verstehen, sei als Beispiel eine induktive Last mit $\underline{Z} = (50 + j 100) \Omega$ angenommen. Bei $f_0 = 3,6$ MHz besteht diese Serienerersatzschaltung aus einem ohmschen Widerstand von 50Ω und einer Induktivität von $4,42 \mu\text{H}$. Rechnet man diese Serienerersatzschaltung in die gleichwertige Parallelersatzschaltung um, so ergeben sich die Werte $R_p = 248,9 \Omega$ und $L_p = 5,53 \mu\text{H}$ bzw. der induktive Widerstand bei $f = 3,6$ MHz ist $\omega L = 125,08 \Omega$. Das Pi-Filter sieht am Ausgang diese Ersatzlast, die aus der Parallelschaltung von $R_p = 248,9 \Omega$ und einem induktiven Widerstand von $125,08 \Omega$ besteht. Zur Kompensation des induktiven Anteils ist eine Kapazität von $353,44 \text{ pF}$ notwendig. Ist z.B. eine ausgangsseitige Kapazität im Pi-Filter von 200 pF eingestellt, so ist eine negative Kapazität von $C = -153,4 \text{ pF}$ notwendig. Da es keine negativen Kapazitäten als Bauteil gibt, kann das Pi-Filter diese Aufgabe der Transformation nicht erfüllen. Der Grenzwert wäre eine Mindestkapazität von $C = 353,44 \text{ pF}$. Dann hätten wir den Fall, dass die ausgangsseitige Kapazität gleich Null ist, also wieder die 2 Element Anpassschaltung. Die Abstimmung des Pi-Filters ist in diesem Fall nicht möglich. Eine induktive Last verringert die ausgangsseitige Filter Kapazität C_2 bis auf den Wert Null.

Betrachten wir noch eine kapazitive Last mit $\underline{Z} = (50 - j 100) \Omega$. Diese Serienerersatzschaltung besteht aus einem ohmschen Widerstand von 50Ω und bei $f = 3,6$ MHz einer Kapazität von $C = 442,09 \text{ pF}$. Die gleichwertige Parallelersatzschaltung ist ein ohmscher Widerstand von $R_p = 250,01 \Omega$ und einer Kapazität von $C_p = 335,67 \text{ pF}$. Ist z.B. beim Pi-Filter eine ausgangsseitige Kapazität $C_2 = 150 \text{ pF}$ vorhanden, ist jetzt eine Kapazität von $C_{\text{ges}} = 485,67 \text{ pF}$ wirksam, dadurch steigen die Verluste des Pi-Filters.

Aus den Berechnungen wird ersichtlich, dass das Pi-Filter einen relativ kleinen Bereich für die Anpassung komplexer Lasten hat. Bei kapazitiven oder induktiven Lastimpedanzen erreicht das Filter schnell seine Grenzen. Ein sicheres Zeichen für eine falsche Einstellung ist immer ein schwammiges Abstimmverhalten. Verlustarm ist das Pi-Filter nur bei reellen und induktiven Lastimpedanzen und bei niedriger ausgangsseitiger Kapazität C_2 .

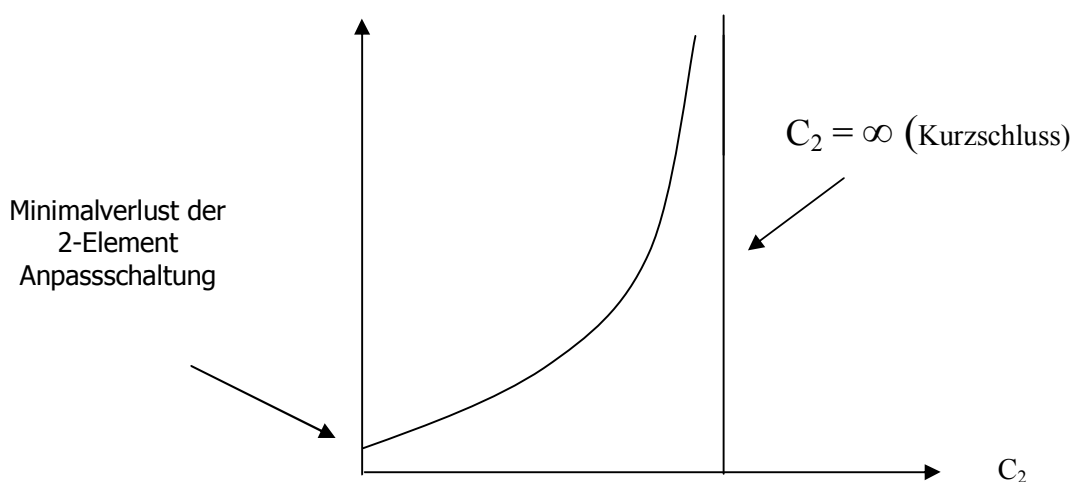


Bild 1.1: Verlust eines Pi-Filters als Funktion der antennenseitigen Kapazität C_2

Wie ist nun ein Pi-Filter abzustimmen, damit es geringe Verluste hat?

Bevor man mit der Abstimmung beginnt, ist die antennenseitige Kapazität auf den geringsten Wert C_{2min} zu stellen, d. h. möglichst große Ankopplung der Last. Danach muss mit C_1 und L Resonanz und Anpassung gesucht werden. Je besser die Anpassung umso mehr Leistung wird der Quelle entnommen. Der sogenannte „Dip“ ist auch im Anoden- bzw. Kollektorstrom sichtbar. Wird keine Resonanz gefunden und ist die Ausgangsleistung gering, ist schrittweise C_2 zu erhöhen und der Vorgang so lange zu wiederholen, bis maximale Leistung dem Sender entnommen wird. Dann ist Resonanz und Anpassung erreicht. Folgt dem Pi-Filter eine weitere Anpassschaltung in Form eines Kopplers, dann muss die Abstimmung des Pi-Filters an einem Dummy-Load mit eingebautem Leistungsmesser erfolgen. Die Einstellung des Pi-Filters darf dann **nicht** mehr verändert werden.

Fre- quenz MHz	C_2 pF	L uH	C_1 pF	1 K Ω	1.5 K Ω	2 K Ω	3 K Ω	4 K Ω	5 K Ω	Ver lust in C_1 W	Ver lust im L W	Umax an der Induk- tivität Volt	Güte des Pi - Filters	Wirkungs- grad des Pi-Filters in Prozent
1.85	100	19.45	366	x						8	43	1395	4.3	94.80
1.85	100	24.12	299		x					10	53	1719	5.3	93.70
1.85	100	28.08	259			x				12	61	1991	6.1	92.70
1.85	100	34.78	210				x			15	74	2445	7.4	91.13
1.85	100	40.5	182					x		17	85	2827	8.5	89.82
1.85	100	45.6	161						x	19	94	3162	9.4	88.68
3.6	100	10.0	189	x						9	44	1412	4.4	97.75
3.6	100	12.46	155		x					10	53	1736	5.4	93.58
3.6	100	14.49	134			x				12	62	2008	6.2	92.62
3.6	100	17.93	109				x			15	75	2462	7.5	91.03
3.6	100	20.85	94					x		17	86	2843	8.6	89.71
3.6	100	23.45	83						x	19	95	3179	9.5	88.57
7.05	100	5.18	98	x						9	46	1445	4.6	94.54
7.05	100	6.38	80		x					11	55	1769	5.6	93.35
7.05	100	7.4	69			x				12	64	2040	6.4	92.37
7.05	100	9.12	56				x			15	77	2494	7.7	90.76
7.05	100	10.59	48					x		17	88	2875	8.8	89.43
7.05	100	11.90	43						x	19	98	3210	9.8	88.27
14.15	100	2.53	52	x						9	51	1507	5.1	93.90
14.15	100	3.09	42		x					11	61	1830	6.1	92.68
14.15	100	3.56	40			x				13	70	2101	7.0	91.64
14.15	100	4.37	30				x			16	84	2553	8.4	89.94
14.15	100	5.06	25.8					x		18	96	2933	9.6	88.53
14.15	100	5.68	22.9						x	20	106	3268	10.6	87.31
21.1	100	1.6	38.4	x						10	57	1557	5.8	93.15
21.1	100	1.95	31.3		x					12	68	1878	6.9	91.80
21.1	100	2.24	27.0			x				14	78	2148	7.8	90.68
21.1	100	2.74	21.9				x			17	93	2599	9.4	88.84
21.1	100	3.17	18.8					x		20	106	2978	10.7	87.32
21.1	100	3.55	16.7						x	22	117	3312	11.8	86.00
29	100	1.07	31.4	x						11	66	1598	6.6	92.12
29	100	1.29	25.6		x					14	78	1918	7.9	90.62
29	100	1.48	22.1			x				16	89	2186	8.9	89.38
29	100	1.81	17.8				x			20	105	2636	10.7	87.34
29	100	2.09	15.3					x		22	119	3015	12.1	85.66
29	100	2.34	13.6						x	25	132	3348	13.3	84.21

Tab.1.3:

Beim Pi-Filter sollte man noch wissen, dass die beiden Kapazitäten C_1 und C_2 in Reihe liegen. Die Gesamtkapazität ist daher immer kleiner als die kleinste Einzelkapazität und die Einstellung der Kondensatoren ist gegenseitig abhängig!

Oft wird eine „schwammige“ Abstimmung bemerkt. Das ist immer der Fall, wenn nur eine relative Abstimmung des Pi-Filters erfolgt ist. Manchmal wird der Unterschied fast nicht bei der Abstimmung bemerkt. Wenn die Spule sich langsam in Rauch auflöst ist es meistens zu spät.

In Tab. 1.3 sind die Gesamtwerte eines Pi-Filters bei verschiedenen anodenseitigen reellen Widerständen einer Röhren-Endstufe aufgelistet.

Die Besonderheit ist, dass die ausgangsseitige Kapazität nur $C_2 = 100$ pF beträgt und konstant ist. Die Rechenleistung ist zu $P = 1000$ W angenommen. Der Gesamtverlust des Filters kann aus dem Wirkungsgrad berechnet werden. Bei der angenommenen Rechenleistung $P = 1000$ W und einem Wirkungsgrad von $\eta = 94$ % gehen 940 W an die Last und 60 W werden in der Anpassschaltung in Wärme gewandelt.

Für die Praxis hat sich eine feste Ausgangskapazität von C_2 ca. 400 pF - selbst für das 160 m Band – als guter Kompromiss bewährt. Die Güte des Filter ist dann etwa $Q = 4$ (siehe auch /4/).

DL3LH, Walter
wa-schau@t-online.de
www.heide-holst.de

Literatur:

- /1/ Theoretische Grundlagen von Leistungsendstufen, Teil I, DL3LH
- /2/ Stromwandler für HF, DL3LH
- /3/ Balune für Kurzwellen 1 – 6, DL3LH
- /4/ Passive Netzwerke zur Anpassung, DL3LH
- /5/ https://www.funkamateur.de/tl_files/downloads/hefte/2009/Collins_FA9_1980.pdf
- /6/ https://www.radiomuseum.org/forum/collins_filter.html

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.