

# **Pi-Filter mit Verlusten**

**Mitteilungen aus dem Institut  
für Umwelttechnik  
Dr. Schau  
DL3LH**

## Vorwort

Ein beliebtes Anpassnetzwerk ist das Tiefpass Pi-Filter. Es gibt zwei wesentliche Anwendungen. Erstens in Leistungsendstufen mit Röhren als vollständigen Ersatz für den früher üblichen Anodenkreis mit Auskopplung und zweitens hinter Sendeendstufen auf der 50 Ω Seite. Beide Anwendungen unterscheiden sich durch die unterschiedlichen Aufgaben und Impedanzpegel. Die grundsätzliche Funktion ist bei beiden Anwendungen gleich.

## 1. Allgemeines

Einer sinusförmigen Quelle mit der komplexen Innenimpedanz  $Z_1$  und der Lastimpedanz  $Z_2$  kann maximale Leistung entnommen werden, wenn  $Z_1 = Z_2^*$  gilt. Der Stern besagt, dass die Lastimpedanz den gleichen Realteil, aber einen konjugiert komplexen Imaginärteil haben muss.

Bei beliebiger Lastimpedanz  $Z_2$  muss zwischen Quelle und Lastimpedanz ein Anpassnetzwerk geschaltet werden, dass die Aufgabe der Transformation von  $Z_1$  auf  $Z_2$  übernimmt.

Ein Anpassnetzwerk 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, aber nur zwei Bedingungen erfüllen muss, ist ein Element frei wählbar – meistens wird aus Unkenntnis der Zusammenhänge die Güte Q als Parameter gewählt.

Reale Spulen und Kondensatoren haben Verluste, die zur Erwärmung dieser Bauteile führen. Der Verlust einer realen Kapazität ist zu  $P_v = U^2 \omega C \tan(\delta)$ . Bei kleinen Verlustwinkeln  $\delta$  ist der  $\tan(\delta)$  gleich dem Argument  $\tan(\delta) \approx \delta$  und wird  $d$  genannt, wobei  $d = 1/Q_c$  der Reziprokwert der Güte ist.  $U$  ist der Effektivwert der Kondensatorspannung. 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  $\delta$  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.

Die Bandbreite eines Anpassnetzwerkes wird durch die Güten der Bauteile und den am Ein- und Ausgang vorhandenen Impedanzen  $Z_1$  und  $Z_2$  beeinflusst. Bei bekannten Impedanzen  $Z_1$ ,  $Z_2$  ist die Betriebsgüte eine feste Größe.

Die Literatur ist voll von Berechnungen des Pi-Filters und geht 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 die ausgangsseitige Kapazität niedrig sein muss. Ein hoher Kapazitätswert würde den Ausgang mehr und mehr kurz schließen, d.h. ein Großteil der HF verbleibt in der Anpassschaltung und führt zu Verlusten und zur Erwärmung der Bauteile und manchmal zu deren Zerstörung.

Ein Pi-Filter mit einer großen Kapazität auf der 50-Ω-Seite muss immer höhere Verluste haben, als ein Filter mit kleiner Ausgangskapazität, da ein Großteil der HF gegen Masse „abgeklatscht“ wird.

Die Anpassschaltung mit der kleineren Ausgangskapazität ist also immer die verlustärmere Lösung. Der Grenzwert einer fehlenden Ausgangskapazität ist dann logischerweise ein APN mit 2 Elementen L und C, die immer weniger Verluste hat, als ein APN mit 3 Elementen.

Ganz allgemein gilt, dass Wärmeentwicklung in einer Anpassschaltung immer ein sicheres Zeichen für eine falsche Dimensionierung ist.

Ganz verlustarm und daher vorzuziehen ist ein APN nur aus Kondensatoren – also überhaupt keine Induktivität. Dazu muss aber die Lastimpedanz  $Z_2$  induktiv sein und der Realteil kleiner als die Quellimpedanz, was meist durch die Wahl der Zuleitungslänge zur Antenne erreicht werden kann.

## 2. Das Pi – Filter als Ersatz für den Anodenkreis in Röhrenendstufen

Geht man bei der Berechnung eines Pi-Filters in einer Röhren-Endstufe in einfacher Weise von einem reellem Innenwiderstand der Leistungsendröhre von  $2000 \Omega$  aus und berechnet

die Transformation auf  $50 \Omega$ , so ergeben sich mit einer Rechenleistung von  $P = 1000 \text{ W}$ , den Güten  $Q_L = 100$ ,  $Q_c = 500$  und der Frequenz von  $f = 3.6 \text{ MHz}$  die Werte nach Tab. 1.

Frequenz in MHz	$C_2$ pF	L $\mu\text{H}$	$C_1$ pF	Verlust in der Induktivität Watt	Leistung an der $50 \Omega$ 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

Aus Tab. 1 ist ersichtlich, dass die Schaltung mit der kleineren Ausgangsgangskapazität  $C_2$  die geringeren Verluste hat. Der Grenzwert für geringste Verluste ist  $C_2 = 0$ . Wir haben dann eine 2 - Element Anpassschaltung vor uns. Die Daten in Tab. 1 sind mit einer Spulengüte von  $Q = 100$  berechnet. Wird nur eine Spulengüte von  $Q = 50$  erreicht, verdoppeln sich die Verluste in der Induktivität in Spalte 5 und nehmen u.U. enorme Werte an. Meistens wird nur eine Spulengüte von  $Q_L = 50$  oder darunter erreicht.

## 3. Impedanzbereiche eines Pi - Filters

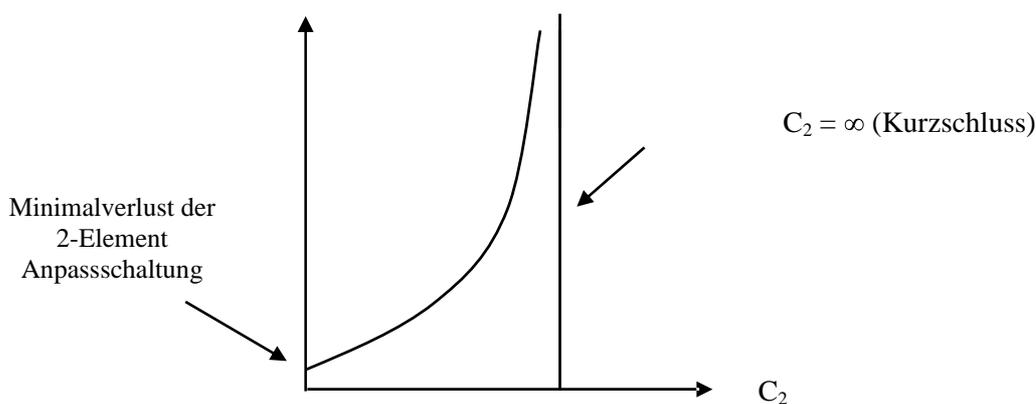
Außer dem Nachteil der nicht eindeutigen Abstimmungen hat das Pi-Filter „Verbotene Bereiche“, in denen das Pi-Filter seine Aufgabe nicht erfüllen kann. Um die verbotenen Bereiche zu verstehen, sei als Beispiel eine induktive Last mit  $Z = (50 + j 100) \Omega$  angenommen. Bei  $f_0 = 3.6 \text{ MHz}$  besteht diese Serienschaltung aus

einem ohmschen Widerstand von  $R = 50 \Omega$  und einer Induktivität von  $L = 4.42 \mu\text{H}$ .

Rechnet man diese Serienschaltung in die gleichwertige Parallelschaltung um, so ergeben sich die Werte  $R_p = 248.9 \Omega$  und  $L_p = 5.53 \mu\text{H}$  bzw. der induktive Widerstand bei  $f = 3.6 \text{ MHz}$  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  $X_L = 125.08 \Omega$  besteht. Zur Kompensation des induktiven Anteils ist eine Kapazität von  $353.45 \text{ pF}$  notwendig. Ist z.B. eine ausgangsseitige Kapazität im Pi-Filter von  $200 \text{ pF}$  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 eine 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 Serienschaltung besteht aus einem ohmschen Widerstand von  $R = 50 \Omega$  und bei  $f = 3.6 \text{ MHz}$  einer Kapazität von  $C = 442.09 \text{ pF}$ . Die gleichwertige Parallelschaltung ist ein ohmscher Widerstand von  $R_p = 250.01 \Omega$  mit 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

$C_{ges} = 485.67 \text{ pF}$  wirksam, dadurch steigen die Verluste des Pi-Filters. Aus den Überlegungen 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 weiches, schwammiges Abstimmverhalten. Es wird nur ein relatives Minimum erreicht.



**Bild 1:** Verlust eines Pi-Filters als Funktion der antennenseitigen Kapazität  $C_2$

#### 4. Abstimmung eines Pi-Filters

Wie ist 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 so genannte „Dip“ ist auch im Anoden- bzw. Kollektorstrom sichtbar. Wird keine Resonanz gefunden und ist die Ausgangsleistung gering, danach wird schrittweise  $C_2$  erhöht 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. 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!

In Tab. 2 sind die Gesamtwerte eines Pi-Filters bei verschiedenen anodenseitigen reellen Widerständen einer Röhren-Endstufe aufgelistet. Die Besonderheit ist, dass die ausgangsseitige Kapazität nur  $C_2 = 100 \text{ pF}$  und konstant ist. Die Rechenleistung ist zu  $P = 1000 \text{ W}$  angenommen.

Der Gesamtverlust des Filters kann aus dem Wirkungsgrad berechnet werden. Bei der angenommenen Rechenleistung  $P = 1000 \text{ W}$  und einem Wirkungsgrad von  $\eta = 94 \%$  gehen  $940 \text{ W}$  an die Last und  $60 \text{ W}$  werden in der Anpassschaltung in Wärme gewandelt. Für die Praxis hat sich eine Ausgangskapazität von  $C_2$  ca.  $400 \text{ pF}$  - selbst für das 160 m Band - als guter Kompromiss bewährt. Die Güte des Filter ist dann etwa  $Q = 4$  (siehe auch /2/).

MHz	C <sub>2</sub> pF	L μH	C <sub>1</sub> pF	1 KΩ	1.5 KΩ	2 KΩ	3 KΩ	4 KΩ	5 KΩ	Ver lust in C <sub>1</sub> W	Ver lust in L W	U <sub>max</sub> an der Induk- tivität Volt	Güte des Pi - Filt.	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
3.60	100	10.0	189	x						9	44	1412	4.4	97.75
3.60	100	12.46	155		x					10	53	1736	5.4	93.58
3.60	100	14.49	134			x				12	62	2008	6.2	92.62
3.60	100	17.93	109				x			15	75	2462	7.5	91.03
3.60	100	20.85	94					x		17	86	2843	8.6	89.71
3.60	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
29.0	100	1.07	31.4	x						11	66	1598	6.6	92.12
29.0	100	1.29	25.6		x					14	78	1918	7.9	90.62
29.0	100	1.48	22.1			x				16	89	2186	8.9	89.38
29.0	100	1.81	17.8				x			20	105	2636	10.7	87.34
29.0	100	2.09	15.3					x		22	119	3015	12.1	85.66
29.0	100	2.34	13.6						x	25	132	3348	13.3	84.21

Tab. 2 Dimensionierung eines Pi-Filters für die Amateurbänder bei konstanter Kapazität C<sub>2</sub> = 100 pF.

## 5. Das Pi – Filter hinter Leistungsstufen

In dem Beitrag „Leistungsstufen mit Röhren und Transistoren Teil 1,“ wurden Eigenschaften eines Pi-Filters in Endstufen behandelt. Dabei war ein Parallelkreis oder ein daraus abgeleitetes Pi-Filter notwendig, weil die Grundschwingung im Anodenstrom nur an einem Parallelkreis eine

hochfrequente Spannung hervorrufen kann. Hinter jedem Transceiver - auf der 50 Ω Seite - wird immer eine Anpassschaltung notwendig /4/, damit an allen Schnittstellen auf dem Weg zur Antenne konjugiert komplexe Anpassung herrscht und Verluste durch Fehlanpassung vermieden werden.

Wird ein Pi-Filter an dieser Stelle eingesetzt ist deren Dimensionierung und die auftretenden Verluste von Interesse. Aus /1/ ist ersichtlich, dass eine einfache LC-Anpassschaltung die bessere und verlustärmste Alternative ist. Allerdings werden Oberschwingungen weniger gut abgesenkt, wie beim Pi-Filter.

Dieser Nachteil wird durch die Eindeutigkeit der Abstimmung wieder wettgemacht. Wird hinter dem unsymmetrischen APN ein richtig dimensionierter Luft - Balun /3/ eingesetzt, kann jede Impedanz einer symmetrischen Antennenzuleitung angepasst werden. Auf besonderen Wunsch einiger Funkamateure soll die Dimensionierung eines Pi-Filters mit Verlusten für die Anwendung hinter einem Transceiver angegeben werden. Da der Berechnungsvorgang weniger von Interesse ist, können Tabellen eine

Übersicht gewährleisten. Wir teilen dazu den möglichen Impedanzbereich in induktive und kapazitive Lasten auf. Die Güte der Spule sei  $Q_L = 50$  und die der Kondensatoren  $Q_C = 500$ . Die Reihenfolge der Zahlen in der Tabelle sind  $C_1$ (pF),  $C_2$ (pF),  $L$ (μH), Verlust in dB(blau). Dabei ist  $C_2$  die Kapazität an der Last. Bei „X“ ist eine Anpassung durch ein Pi-Filter nicht möglich, weil man sich im „verbotenen Bereich“ befindet. Die Berechnung erfolgt für die Frequenz  $f = 3.6$  MHz. Für andere Frequenzen sei auf /3/ verwiesen.

Realteil in Ω Imaginärteil Ω	1 Ω	5 Ω	10 Ω	100 Ω	200 Ω	300 Ω	400 Ω	500 Ω	1000 Ω	2000 Ω	3000 Ω	4000 Ω	5000 Ω
j 10	578 5000 3.08 0.28	2445 100 0.26 0.44	1655 100 0.48 0.27	95 500 2.46 0.11	533 500 4.31 0.27	466 400 5.25 5.25	679 400 5.63 0.40	337 300 6.76 0.35	884 300 7.49 0.70	739 200 10.75 0.87	1016 200 10.82 1.25	1204 200 10.80 1.59	151 100 19.76 0.98
j 50	950 1100 10.97 1.47	497 1200 6.54 0.47	578 1300 4.80 0.35	420 700 3.42 0.19	447 500 4.47 0.25	784 500 4.86 0.39	645 400 5.74 0.40	290 300 6.80 0.34	877 300 7.53 0.70	756 200 10.77 0.87	1015 200 10.83 1.24	1203 200 10.80 1.59	148 100 19.76 0.98
j 100	1287 600 13.39 3.12	277 600 12.67 0.82	665 700 8.30 0.69	802 800 4.04 0.34	406 500 4.84 0.27	346 400 5.57 0.29	624 400 5.89 0.40	246 300 6.90 0.34	871 300 7.57 0.70	733 200 10.79 0.87	1013 200 10.84 1.24	1202 200 10.81 1.59	144 100 19.77 0.98
j 200	928 300 25.85 4.38	1410 400 11.90 2.69	1015 400 11.94 1.57	494 500 6.56 0.41	646 500 5.69 0.40	430 400 6.24 0.35	660 400 6.23 0.44	242 300 7.27 0.35	869 300 7.67 0.71	729 200 10.85 0.87	1672 300 7.43 1.79	1201 200 10.82 1.59	138 100 19.79 0.98
j 300	X	1570 300 13.74 4.13	1570 300 13.74 4.13	700 400 8.19 0.64	557 400 7.24 0.47	651 400 6.75 0.48	1184 500 5.32 0.70	340 300 7.70 0.41	883 300 7.76 0.73	729 200 10.90 0.87	1012 200 10.89 1.25	1201 200 10.84 1.59	134 100 19.82 0.98
j 400	X	1073 200 22.92 4.24	791 200 22.90 2.62	580 300 10.81 0.76	239 300 9.40 0.48	236 300 8.63 0.43	358 300 8.36 0.45	479 300 8.21 0.49	910 300 7.85 0.76	733 200 10.95 0.88	1013 200 10.91 1.25	1202 200 10.85 1.59	131 100 19.84 0.98
j 500	X	1496 200 18.48 6.16	1283 200 18.54 4.10	1025 300 10.13 1.21	684 300 9.64 0.74	580 300 9.10 0.62	582 300 8.72 0.59	629 300 8.46 0.60	950 300 7.92 0.81	740 200 11.0 0.90	1016 200 10.93 1.26	1203 200 10.86 1.60	130 100 19.88 0.98

j 1000	X	984 100 36.13 8.53	868 100 36.13 6.09	1365 200 13.51 2.72	1000 200 13.47 1.62	792 200 13.28 1.21	662 200 13.0 1.00	581 200 12.75 0.89	544 200 11.80 0.77	823 200 11.24 1.02	1051 200 11.04 1.34	1222 200 10.92 1.65	151 100 20.10 1.00
j 2000	X	X	1412 100 26.09 12.44	1025 100 26.16 4.25	749 100 26.09 2.65	540 100 25.87 1.95	352 100 25.50 1.55	118 100 24.85 1.29	1200 200 11.75 1.77	1115 200 11.38 1.52	1201 200 11.14 1.65	1309 200 11.00 1.87	1412 200 10.90 2.11
j 3000	X	X	X	1347 100 23.93 7.04	1178 100 23.96 4.83	1043 100 23.97 3.75	931 100 23.95 3.09	836 100 23.90 2.65	506 100 23.42 1.63	175 100 22.06 1.14	162 100 21.35 1.08	288 100 21.17 1.16	402 100 21.07 1.27
j 4000	X	X	X	1487 100 22.94 9.28	1376 100 22.97 6.77	1281 100 22.99 5.46	1198 100 23.00 4.62	1124 100 23.00 4.03	857 100 22.90 2.56	588 100 22.41 1.70	497 100 21.91 1.48	497 100 21.56 1.45	536 100 21.43 1.49
j 5000	X	X	X	1526 100 22.39 11.21	1483 100 22.41 8.44	1415 100 22.83 6.99	1352 100 22.44 6.04	1296 100 22.45 5.34	1074 100 22.44 3.53	820 100 22.24 2.32	704 100 21.95 1.93	662 100 21.67 1.79	662 100 21.46 1.77
j 10000	X	X	X	1677 100 21.36 17.07	1656 100 21.37 14.14	1636 100 21.37 12.47	1616 100 21.38 11.30	1597 100 21.38 10.42	1508 100 21.40 7.82	1365 100 21.42 5.58	1259 100 21.41 4.52	1183 100 21.37 3.92	1129 100 21.33 3.56

Tab. 3: Pi – Filter mit einer Eingangsimpedanz  $R_e = 50 \Omega$  bei induktiven Lasten  $\underline{Z} = R + j X$

Realteil in $\Omega$	1	5	10	100	200	300	400	500	1000	2000	3000	4000	5000
Imaginärteil $\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$	$\Omega$
-j 10	5325 100 0.79 1.43	2565 100 1.12 0.46	1748 100 1.33 0.28	412 500 3.02 0.16	231 400 4.23 0.20	509 400 5.22 0.31	58 300 5.83 0.26	493 300 6.69 0.39	889 300 7.47 0.70	740 200 10.73 0.87	1017 200 10.81 1.25	1236 200 10.66 1.69	152 100 19.75 0.98
-j 50	4419 100 2.41 3.78	2574 100 2.67 1.17	1833 100 2.86 0.67	267 300 3.25 0.15	463 400 4.47 0.25	603 400 5.16 0.34	239 300 6.11 0.29	419 300 6.71 0.37	900 300 7.44 0.71	744 200 10.72 0.87	1078 200 10.80 1.25	1205 200 10.79 1.59	156 100 19.75 0.98
-j 100	3800 100 4.09 5.87	2120 100 14.34 11.98	1942 100 4.45 1.18	289 200 4.29 0.20	289 300 4.82 0.23	270 300 5.56 0.27	378 300 6.24 0.33	493 300 6.69 0.39	131 200 9.46 0.44	750 200 10.69 0.88	1021 200 10.79 1.25	1207 200 10.78 1.59	160 100 19.74 0.98
-j 200	3177 100 6.66 8.8	2502 100 6.78 3.7	2030 100 6.90 2.27	100.1 100 6.65 0.28	189 200 6.03 0.27	613 300 5.69 0.39	606 300 6.36 0.42	648 300 6.67 0.46	245 200 9.58 0.47	764 200 10.65 0.89	1027 200 10.77 1.26	1210 200 10.77 1.59	169 100 19.73 0.99
-j 300	X	2431 100 8.61 5.18	2079 100 8.70 3.34	468 100 9.02 0.50	585 200 7.17 0.46	325 200 7.37 0.37	133 200 7.48 0.34	805 300 6.66 0.55	353 200 9.64 0.51	781 200 10.60 0.90	1034 200 10.74 1.26	1214 200 10.76 1.60	180 100 19.72 0.99
-j 400	X	2365 100 10.01 6.49	2098 100 10.08 4.38	659 100 10.49 0.73	827 200 7.72 0.66	589 200 7.97 0.52	449 200 8.20 0.46	371 200 8.45 0.44	443 200 9.69 0.55	800 200 10.56 0.92	1043 200 10.72 1.28	1219 200 10.74 1.61	191 100 19.71 1.00
-j 500	X	2307 100 11.11	2100 100 11.17	807 100 11.58	204 100 11.25	783 200 8.32	639 200 8.53	553 200 8.74	527 200 9.72	823 200 10.53	1053 200 10.70	1224 200 10.73	203 100 19.71

		7.65	5.34	0.98	0.52	0.68	0.59	0.55	0.61	0.94	1.29	1.62	1.00
-j 1000	X	2120 100 14.34 11.98	2043 100 14.36 9.24	1265 100 14.62 2.45	864 100 14.77 1.43	602 100 14.83 1.03	385 100 14.79 0.81	129 100 14.51 0.68	905 200 9.82 0.96	961 200 10.39 1.10	1120 200 10.60 1.39	1263 200 10.66 1.69	267 100 19.69 1.09
-j 2000	X	X	1944 100 16.84 14.18	1612 100 16.95 5.49	1361 100 17.04 3.58	1176 100 17.12 2.71	1032 100 17.19 2.20	915 100 17.25 1.87	535 100 17.49 1.16	181 100 17.86 0.88	165 100 18.53 0.91	292 100 19.24 2.03	406 100 19.70 1.17
-j 3000	X	X	X	1719 100 17.49 8.03	1563 100 17.99 5.67	1434 100 18.04 4.48	1326 100 18.09 3.74	1233 100 18.13 3.23	913 100 18.33 2.02	611 100 18.70 1.38	511 100 19.07 1.26	507 100 19.43 1.28	545 100 19.72 1.36
-j 4000	X	X	X	1757 100 18.49 10.09	1655 100 18.52 7.50	1565 100 18.56 6.12	1485 100 18.59 5.23	1414 100 18.62 4.59	1146 100 18.76 2.97	855 100 19.03 1.96	725 100 19.29 1.67	677 100 19.54 1.59	675 100 19.75 1.61
-j 5000	X	X	X	1773 100 18.84 11.79	1702 100 18.86 9.07	1637 100 18.89 7.58	1577 100 18.21 6.59	1522 100 18.93 5.87	1301 100 19.04 3.93	1034 100 19.24 2.60	893 100 19.43 2.13	823 100 19.61 1.95	795 100 19.78 1.90
-j 10000	X	X	X	1781 100 19.60 17.42	1761 100 19.61 14.49	1741 100 19.61 12.81	1722 100 19.62 11.64	1704 100 19.62 10.75	1617 100 19.66 8.12	1475 100 19.72 5.83	1366 100 19.79 4.74	1284 100 19.86 4.11	1224 100 19.92 3.72

Tab. 4: Pi – Filter mit einer Eingangsimpedanz  $Re = 50 \Omega$  bei kapazitiven Lasten  $\underline{Z} = R - j X$

Wenn man die beiden Tabellen 3, 4 genauer betrachtet, wird ersichtlich, dass für die Anpassung meist nur eine kleine Ausgangskapazität von  $C_{2max} = 500 \text{ pF}$  benötigt wird, die als Festkapazität ausgeführt werden kann. Man braucht also keine aufwändige, veränderliche Kapazität. Der numerische Wert der Ausgangskapazität ist maßgebend für die Verluste im Pi-Filter /3/. Da die Abstimmung immer mehrdeutig ist, muss immer mit der kleinsten Ausgangskapazität  $C_2$  – große Ankopplung an die Antennenzuleitung - bei der Abstimmung begonnen werden. Wird keine Resonanz mit  $S = 1$  am Eingang erreicht, wird die Ausgangskapazität erhöht und die Abstimmung neu durchgeführt. Vergleicht man die Werte aus den Tabellen 3/4 mit den Tabellen 6/7 in /2/, zeigt sich deutlich der Vorteil einer einfachen LC-Anpassschaltung. Eindeutige Abstimmung, weniger Blindelemente, geringere Verluste und ein größerer Impedanzbereich.

Jeweils in der letzten Zeile eines Werteblocks in Tab. 3/4 sind die Verluste des Pi-Filters in dB angegeben (blau). Aus diesem Wert kann der Verlust in Watt bzw. der Wirkungsgrad des Pi-Filters bestimmt werden.

#### Beispiel zur Tabelle 4:

Die Eingangsimpedanz einer Antennenzuleitung wird auf  $\underline{Z} = (3000 - j 200) \Omega$  bestimmt. Für eine Abstimmung auf Resonanz sind notwendig:  $C_1 = 1027 \text{ pF}$ ,  $C_2 = 200 \text{ pF}$  (Kondensator direkt an der Hühnerleiter – vor dem Übergang von unsymmetrisch auf symmetrisch und eine Induktivität  $L = 10.77 \mu\text{H}$ ).

Der Verlust nach Tabelle 4 ist  $L_v = 1.26 \text{ dB}$ . Mit dem Taschenrechner bestimmt man daraus den linearen Faktor  $a = 10^{0.126} = 1.3365$ . Angenommen wird haben bei  $S = 1$  eine Eingangsleistung von  $P_e = 600 \text{ W}$ , dann ist die Leistung hinter dem Pi –Filter,  $P_{out} = 600 \text{ W} / 1.3365 = 448.90 \text{ W}$ . Die Verluste im Filter sind  $P_v = 151 \text{ W}$ . Der Wirkungsgrad des Filters wird daraus  $\eta = 1 - 151/600 = 74.84 \%$ .

Ebenso einfach kann der Verlust eines Kopplers bzw. der Gesamtverlust einer Antennenanlage durch eine Messung bestimmt werden /5/.

Bei heutigen Anwendungen zur Anpassung hinter Senderstufen ist eine einfache LC-Anordnung von Vorteil. Eindeutig in der Abstimmung und geringere Verluste. Bei richtiger Auslegung kann sogar der Balun entfallen.



DL3LH, Walter  
schau@rs-systems.info  
[www.rs-systems.info](http://www.rs-systems.info)

### **Literatur auf [www.ham-on-air](http://www.ham-on-air):**

- /1/ Die Antenne macht die Musik, DL3LH,
- /2/ Antennenmesstechnik I - IV , DL3LH,
- /3/ Passive Netzwerke zur Anpassung, DL3LH,
- /4/ Der Kondensator das unbekannte Wesen, DL3LH,
- /5/ Die Induktivität in der Praxis, DL3LH,
- /6/ Mythos “Balun I, II ”, DL3LH,
- /7/ Ströme, Spannungen und Verluste in Anpassschaltungen, DL3LH
- /8/ Mythos „Resonante Antenne“, DL3LH,
- /9/ Anpassung, Wirkungsgrad und Co, DL3LH,
- /10/ Die T-Antenne, DL3LH
- /11/ Warum eine Anpassschaltung bei KW erforderlich ist, DL3LH
- /12/ Der CC – Koppler, DL3LH

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.