

Faustformel reicht nicht

Wolfgang Wippermann, DGØSA

Wer Baluns bauen will, muss sich mit Energieübertragung in Pulvereisenkernen, Kopplungsfaktoren und weiterer Theorie befassen. Nur so wird die gewünschte Bandbreite und Effektivität erzielt.

Breitbandübertrager sind diejenigen, deren Bandbreite ein Mehrfaches der Mittenfrequenz aufweisen, z.B. 3,5...30 MHz. Eine Faustformel besagt, dass der Wert des Blindwiderstandes X_L bei der unteren Nutzfrequenz der primären Induktivität eines Übertragers etwa das Vierfache der primären Last R_e (bzw. des Innenwiderstands der Quelle) haben sollte.

Bedingt durch das Übersetzungsverhältnis der beiden Wicklungen wird X_L der sekundären Induktivität dann ebenfalls den vierfachen Wert der Last R_L aufweisen.

Nehmen wir als Beispiel einen 50-Ω-Übertrager mit einem Übersetzungsverhältnis 1 : 1, der von $f_u = 3,5$ MHz bis $f_o = 30$ MHz (Mittenfrequenz $f_m = 10,25$ MHz) funktionieren soll.

$$L = 4 \cdot R_e / (2 \cdot \pi \cdot f_u)$$

[R_e in Ω], [f_u in MHz], [L in μH]

$$L = 4 \cdot 50 / (2 \cdot 3,14 \cdot 3,5) = 9 \mu\text{H}$$

Nach der Faustregel ergibt die primäre Induktivität 9 μH, denn bei 3,5 MHz beträgt der Blindwiderstand $X_L = \omega L = 200 \Omega$. In der Praxis kann man jedoch nur Übertrager wickeln, die auch Streuinduktivitäten aufweisen. Wenn ein Kopplungsfaktor von $k = 0,99$ erreicht wird, kann man schon sehr zufrieden sein. Diesen erkaufte sich der Nachbauer durch eine Bewicklung des Kerns, bei der die Drähte der primären Wicklung sehr dicht an denen der sekundären anliegen oder bei der verdrehten Drähte Verwendung finden.

Große Kapazitätswerte

Misst man die Kapazität zwischen den Wicklungen solcher Breitbandübertrager, sind große Werte festzustellen. Diese ermöglichen Gleichtaktströme den Weg über das Bauteil, was nachteilig ist.

Mit Simulationsprogrammen kann man den Frequenzgang darstellen (Bild 1).



Autor

Dipl.-Ing. Wolfgang Wippermann, DGØSA
Jahrgang 1950, Amateurfunkgenehmigung seit 1967, Studium

Elektronik an der Universität Rostock bis 1974
Amateurfunkpeilen von 1967 bis 1990
Besondere Interessen: Simulation und Aufbau funktechnischer Schaltungen; Spulen, Filter, Anpassungen, Baluns und „alles, was gewickelt ist“.

Anschrift:
Lerchenweg 10
18311 Ribnitz-Damgarten
www.qsl.net/dg0sa
dg0sa@qsl.net

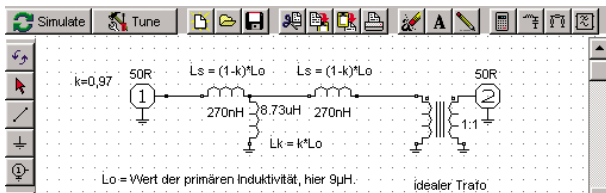


Bild 1: Im Eingabebildschirm bei der Rechnersimulation lassen sich Netzwerke darstellen und simulieren

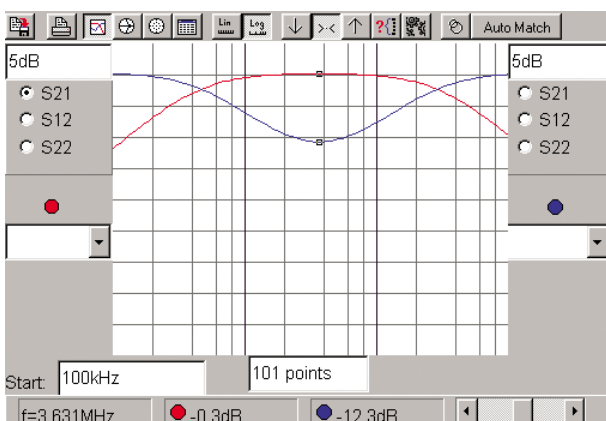


Bild 2: Bei konstantem Kopplungsfaktor zeigt sich im betrachteten Frequenzbereich die niedrigste Dämpfung bei 6,8 MHz

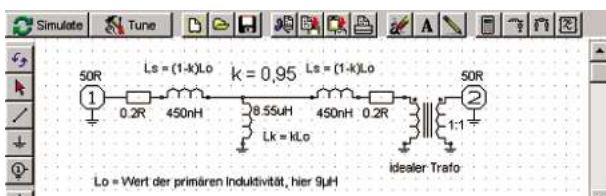


Bild 3: Schmalbandiger Übertrager, der sich als Balun einsetzen lässt

Das Modell berücksichtigt die Streuung durch die rechnerische Einbindung des Koppelfaktors k . Verluste sind in den Widerständen zusammengefasst – sicher eine sehr grobe Modellierung.

In der Simulation zeigt sich eine obere und eine untere Nutzfrequenz. Lassen wir eine Abweichung von $-0,2$ dB von der Mittenfrequenz zu, liegen diese beiden Grenzen bei 2,7 MHz und 20 MHz. Außerdem macht sich eine Grunddämpfung von $-0,12$ dB bemerkbar, die auch nach Entfernen der beiden Widerstände $R = 0,2 \Omega$ noch $-0,09$ dB beträgt.

Im **Bild 2** wird vereinfachend angenommen, dass der Kopplungsfaktor im betrachteten Bereich konstant sei. Die niedrigste Dämpfung zeigt sich bei 6,8 MHz, diese liegt gegenüber der Mittenfrequenz (10,25 MHz) zu tief.

Ein Einsatz als Balun erfordert, dass zwischen Wicklung und sekundärer Wicklung nur eine geringe Kapazität auftreten soll. Mit speziellen Techniken lässt sich erreichen, dass die kapazitive Kopplung sehr klein und die induktive groß wird.

Im Ergebnis ist mit $k = 0,9...0,96$ zu rechnen. Dies gilt für Ferrite mit ausrei-

Tabelle 1

Kopplungsfaktor k	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5
Bandbreite B/fo	0,07	0,15	0,23	0,32	0,41	0,51	0,62	0,74	0,87	1,0

Tabelle 1: Gegenüberstellung von Kopplungsfaktor zu Bandbreite bei Bandfiltern

chender Permeabilität, bei Pulvereisenkernen ergibt sich meist ein Koppelfaktor, der noch viel weiter vom Ideal $k = 1$ entfernt liegt.

Einfluss der Kopplung

Was passiert, wenn zwischen primärer und sekundärer Wicklung ein Zwischenraum von einigen Millimetern angeordnet wird? Der Koppelfaktor sinkt – die Annahme, bei Ringkernen verliefen alle Feldlinien im Ferrit, ist leider nicht ganz richtig. Bei gegenüberliegenden Wicklungen lässt sich beispielsweise bei einer Permeabilität $\mu_o = 125$ ein Koppelfaktor von ca. 0,5 erreichen (bei Pulvereisen sogar nur 0,2).

Aber selbst damit kann man Übertrager herstellen, wenn auch mit zusätzlicher kapazitiver Kompensation. Die Bandbreite fällt jedoch geringer aus. Breitbandübertrager sollte man deshalb nicht mit Pulvereisenkernen bauen. Nehmen wir also $k = 0,95$ an. Das Beispiel in **Bild 3** mit einem Koppelfaktor von nur 0,95 ist schon weiter weg vom Ideal. Die Mittenfrequenz ist auf etwa 2,8 MHz gesunken (**Bild 4**), die Nutzungsgrenzen (-0,2 dB gegenüber Mittenfrequenz) liegen jetzt bei 1,4 MHz und 5,7 MHz.

Dafür ist die kapazitive Verkopplung sehr gering; wenn ein Energiefluss stattfinden soll, so muss diese „durch den Kern“. Die Grunddämpfung steigt auf -0,5 dB.

Ein solcher Übertrager lässt sich als Balun einsetzen, wenn auch nur mit den Einschränkungen der geringen Bandbreite und der beachtlichen Einfügedämpfung. Es wird deutlich, dass die Bandbreite eines Übertragers vom Koppelfaktor k abhängt und dass es eine Mittenfrequenz gibt.

Formel gesucht

Deshalb sollte die Faustformel gegen eine ersetzt werden, welche eine exaktere Dimensionierung des Breitbandübertragers ermöglicht. Sie ist auch nicht sehr kompliziert und mit einem Taschenrechner zu bewältigen.

Die folgende Betrachtung ist am Beispiel eines 1 : 6-Baluns dargestellt. Dazu werden folgende Angaben benötigt: R : Wert der primären Last bzw. Innenwiderstand der Quelle [Ω], f_m : Mittenfrequenz des Nutzbereiches [MHz], k : Koppelfaktor.

Die Mittenfrequenz ermittelt man aus den beiden Nutzfrequenzgrenzen:

Tabelle 2a

Koppelfaktor k	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9
Bandbreite B/fo	1,0	1,18	1,36	1,58	1,83	2,15	2,56	3,13	4,05

Tabelle 2a: Resultierende Bandbreiten bei kompensierten Bandfiltern im Bereich $k = 0,5...0,9$

Tabelle 2b

Koppelfaktor k	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99
Bandbreite B/fo	4,33	4,62	5,0	5,34	6,02	6,82	7,93	9,81	14,01

Tabelle 2b: Koppelfaktor $k = 0,91...0,99$ bei kompensierten Bandfiltern

$$f_{un} = \sqrt{f_u \cdot f_n}$$

$$f_n = \sqrt{3,5 \text{ MHz} \cdot 30 \text{ MHz}} = 10,25 \text{ MHz}$$

Schwieriger wird die Ermittlung des Koppelfaktors. Für die Bewicklung empfiehlt sich eine Form, die einerseits den magnetischen Koppelfaktor hoch und andererseits die kapazitive Bindung gering hält. Diese beiden Dinge sind entscheidend für den Einsatz des Übertragers als Balun, denn über die magnetische Verkopplung gelangt die Energie wie gewünscht zur Antenne bzw. zum Empfänger. Je geringer die kapazitive Verkopplung ist, um so mehr werden Mantelströme (Gleichtaktströme) unterbunden.

Koppelfaktor messen

Verwendung findet ein TN36/23/14-Kern aus dem Material 4C65. Bewickelt wird mit Kupferlackdraht ca. 1 mm Durchmesser oder Teflonlitze vom Typ AWG18 (**Bild 5**). Durch Messungen lässt sich die primäre und sekundäre Induktivität feststellen: $L_p = 2,57 \mu\text{H}$ (vier Windungen, viermal innen durchgesteckt); $L_s = 15,87 \mu\text{H}$ (zehn Windungen, d.h. zehnmal innen durchgesteckt). Nun schließt man primäre und sekundäre Wicklung in Reihe und misst etwa $L_1 = 30,93 \mu\text{H}$.

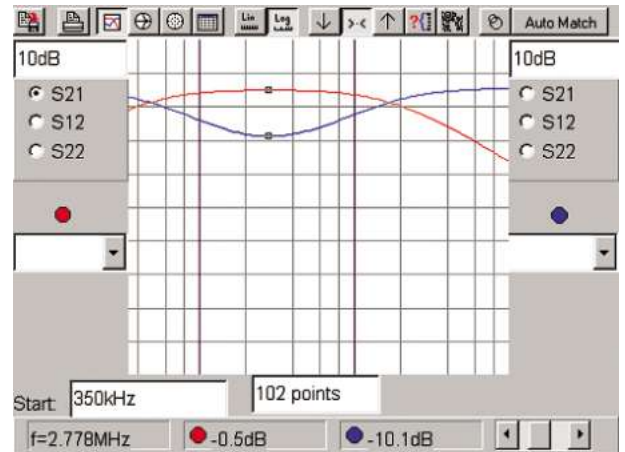


Bild 4: Der Koppelfaktor k bestimmt die Bandbreite des Übertragers

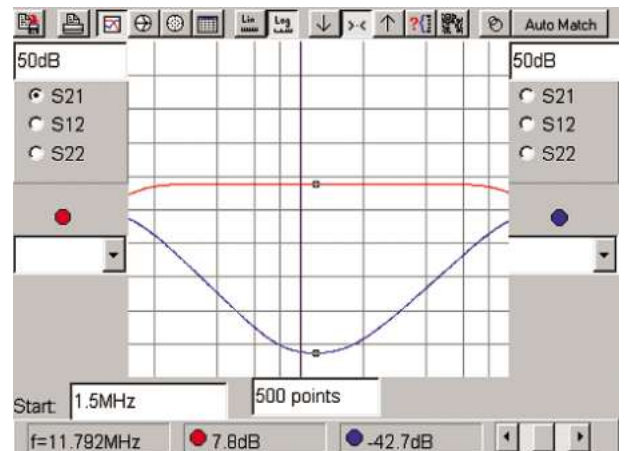


Bild 6: Optimierte Übertragungseigenschaften

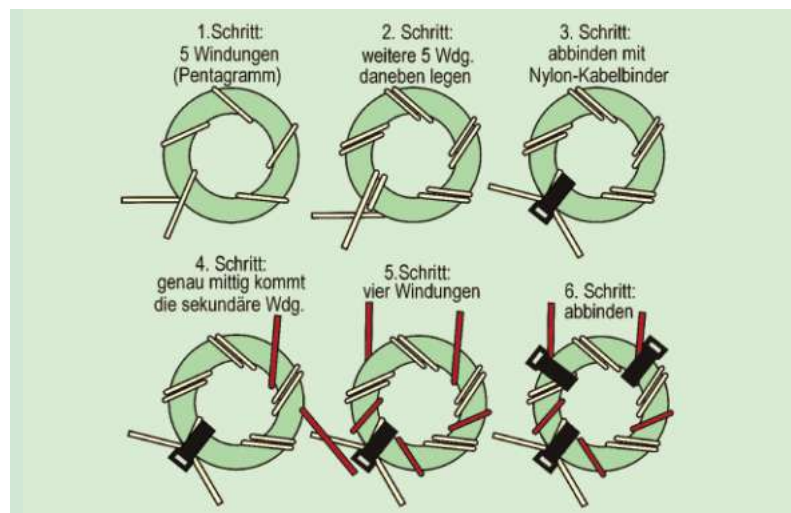


Bild 5: Schritt für Schritt zum bewickelten Kern

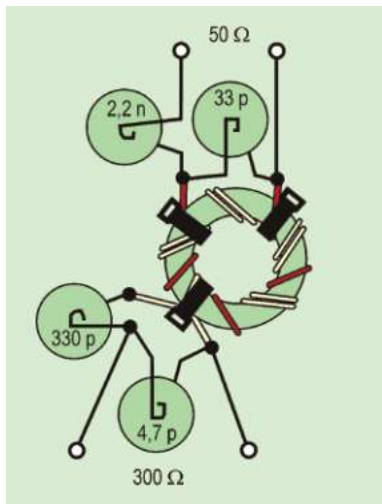


Bild 8: Beschaltung der Kondensatoren am Kern



Bild 9: Praktischer Aufbau eines gewickelten Kerns

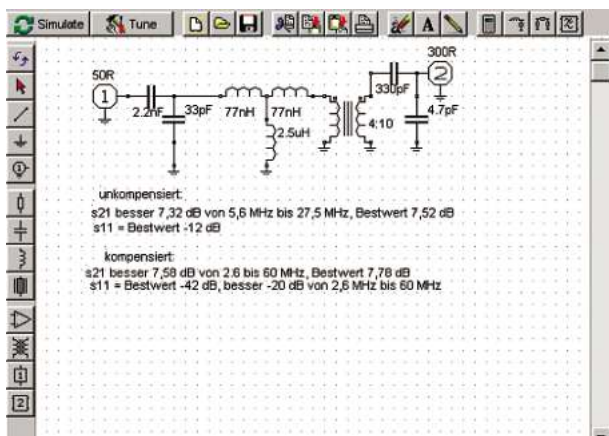


Bild 7: Stromlaufplan mit zusätzlich eingefügten Kondensatoren

Literatur und Bezugsquellen

- [1] The ARRL Handbook 2000, Kapitel 6.42
- [2] Lechner/Fink: „Kurzwellensender“, Militärverlag der DDR, 1. Auflage S. 171, Formel 7.45
- [3] Wolfgang Wippermann, DGØSA: „Bandfilter mit nur einem Pulvereiisen-Ringkern“, CQ DL 6/04, S. 412
- [4] Dipl.-Ing. W. Prüfert, DL8USA, ex Y24GE: „Breitbandfilter für UKW ...“, Funkamateure Digest, S. 205
- [5] Java-Programm zur Bestimmung der Näherung von Bauteilwerten für Bandfilter unter www.cqdl.de/download

Durch Vertauschen der Anschlüsse der primären Wicklung ergibt sich L_2 zu 6,15 μH . Es folgt die Bestimmung des Koppelfaktors [1].

$$k = \frac{L_1 \cdot L_2}{4 \cdot \sqrt{L_p \cdot L_s}} = \frac{30,93 \cdot 6,15}{4 \sqrt{2,57 \cdot 15,87}} = 0,97$$

Nachteil ist sicher der Umstand, dass k bei einer Frequenz bestimmt wird, die nicht in der Nähe der Mittenfrequenz des Übertragers liegt. Mit einem LC-Messgerät kommen aber hinreichend genaue Werte heraus. Mit der Formel

$$L_{1s} = \frac{R}{2 \cdot \pi \cdot f \sqrt{1 - k^2}}$$

wird die primäre Induktivität (in μH) so gewählt, dass man die Mittenfrequenz genau trifft:

$$L_{1s} = \frac{50}{2 \cdot \pi \cdot 10,25 \sqrt{1 - 0,97^2}} = 3,2 \mu\text{H}$$

Dieser Idealwert liegt nahe an dem der primären Induktivität des gewickelten Übertragers (2,57 μH).

Misst man diese durch, so sind zwischen den Anschlüssen Werte von ca. 5 pF zu erreichen. Dazu muss aber die primäre Wicklung sorgfältig in die Mitte des Zwischenraumes der sekundären gelegt werden (Bild 5, Schritt 4 bis 6). Außerdem fällt die nur mangelhafte Eingangsreflexion von -12 dB an der besten Stelle (bei ca. 12 MHz) auf und dass schon gegenüber dem Idealwert eine Dämpfung von -0,3 dB existiert – die Streuinduktivitäten sind der Grund.

Kompensierter Balun

Diese Mängel lassen sich nur kapazitiv kompensieren. Dann kommt eine vierver-

Tabelle 3

k	f _{G(unten)}	f _{G(oben)}	B/fo	C ₁ [pF]	C ₂ [pF]	L ₁ [μH]	L _{1s} [μH]	L _{1k} [μH]
0,99	0,0711	14,08	14,01	44677,5	225,644	56,6960	0,56696	56,1290
0,98	0,1009	9,908	9,81	31351,6	319,913	40,3973	0,80794	39,5894
0,97	0,1241	8,058	7,93	25401,4	392,805	33,2400	0,99720	32,2428
0,96	0,1439	6,965	6,82	21827,0	454,728	29,0126	1,16050	27,8521
0,95	0,1615	6,180	6,02	19368,8	509,703	26,1559	1,30779	24,8481
0,94	0,1778	5,515	5,34	17540,1	559,789	24,0689	1,44414	22,6248
0,93	0,1928	5,188	5,00	16107,8	606,206	22,4651	1,57255	20,8925
0,92	0,2070	4,825	4,62	14944,2	649,747	21,1874	1,69499	19,4924
0,91	0,2206	4,547	4,33	13972,8	690,963	20,1425	1,81283	18,3297
0,90	0,2333	4,280	4,05	13144,6	730,253	19,2706	1,92706	17,3435
0,85	0,2920	3,420	3,13	10272,3	906,379	16,4392	2,46588	13,9733
0,80	0,3443	2,908	2,56	8488,26	1061,03	14,9208	2,98415	11,9366
0,75	0,3930	2,545	2,15	7218,59	1203,10	14,0361	3,50904	10,5271
0,70	0,4398	2,273	1,83	6240,12	1337,17	13,5309	4,05926	9,47161
0,65	0,4848	2,062	1,58	5445,25	1466,03	13,2909	4,65182	8,63910
0,60	0,5289	1,890	1,36	4774,65	1591,55	13,2629	5,30516	7,95775
0,55	0,5724	1,748	1,18	4192,48	1715,10	13,4263	6,04184	7,38448
0,50	0,6141	1,628	1,01	3675,53	1837,76	13,7832	6,89161	6,89161
0,45	0,6558	1,524	0,87	3207,95	1960,41	14,3566	7,89610	6,46045
0,40	0,6966	1,434	0,74	2778,44	2083,83	15,1946	9,11674	6,07783
0,35	0,7373	1,356	0,62	2378,62	2208,72	16,3833	10,6492	5,73417
0,30	0,7774	1,288	0,51	2002,08	2335,76	18,0743	12,6520	5,42229
0,25	0,8164	1,227	0,41	1643,75	2465,62	20,5468	15,4101	5,13670
0,20	0,8538	1,171	0,32	1299,50	2598,99	24,3655	19,4924	4,87311
0,15	0,8914	1,122	0,23	965,859	2736,60	30,8537	26,2257	4,62807
0,10	0,9280	1,077	0,15	639,827	2879,22	43,9881	39,5893	4,39881
0,05	0,9640	1,036	0,07	318,709	3027,73	83,6608	79,4777	4,18305

Tabelle 3: Wertetabelle für Breitband-Transformatoren nach Bild 10/Schaltung 1, normiert für 50 Ω und 1 MHz

sprechende Übertragungsfunktion heraus (Bild 6). Die resultierende Schaltung zeigt Bild 7.

In [3] wurde die relative Bandbreite eines Filters in Abhängigkeit des Koppelfaktors k beschrieben (Tabelle 1). Kompensierte Breitbandübertrager funktionieren nach den gleichen Prinzipien, ihr Faktor ist eben nur größer. Sie haben eine Bandbreite, die ebenfalls nur von k abhängt. Je mehr sich dieser dem Idealwert 1 nähert, um so größer wird sie.

Die Tabellen 2a und b sind von Bedeutung für die Dimensionierung kompensierter Breitbandübertrager. So beschrieb Wolfgang Prüfert, DL8USA, ex Y24GE, einen Vorschlag von G. Dünnbier für einen Breitbandfilter für UKW-Hör- und Fernsehempfänger zur Störfestigkeitserhöhung [4]. Dabei handelt es sich ebenfalls um einen kompensierten Breitbandübertrager mit der gewünschten Sperrwirkung gegen Gleichtaktströme. Jedoch ergibt sich mit dem erreichten $k = 0,86$ nicht die gewünschte Bandbreite von 42...800 MHz. Die Mittenfrequenz ist

$$f_0 = \sqrt{42 \cdot 800} = 183 \text{ MHz}$$

Das Verhältnis $B/f_0 = 758/183 = 4,1$ erfordert laut Tabelle $k = 0,91$! Trotzdem ist dieser Vorschlag bemerkenswert.

Besonderheiten bei 1 : 6

Beim 1 : 6-Breitbandübertrager-Balun könnte man vielleicht auch meinen, zwei Kondensatoren würden zur Kompensation genügen. Lässt man die Längskondensatoren 2,06 nF und 343 pF weg, so verschlechtert sich der Frequenzgang bei tiefen Frequenzen, lässt man die anderen Kondensatoren weg, passiert dies bei hohen.

Die eingesetzten Kondensatoren müssen natürlich der Leistung entsprechen, die über den Balun geschickt wird. Da die gesamte Leistung durch den Kern muss, sollte bei höheren ein Temperaturtest am Kern vorgenommen werden. Praktisch aufgebaut und durchgemessen, konnte der Autor die Eignung des 4C65-Kerns nachweisen (Bilder 8 und 9). Kupferlackdraht bringt ca. 5 pF zwischen den Wicklungen und Teflon-Litze AWG18 ca. 10 pF. Oberhalb 30 MHz wird dadurch die Balunwirkung eingeschränkt. X_C beträgt bei 5 pF und 30 MHz ca. 1 kΩ. Das ist ausreichend und sicher viel besser als bei manchem teurem Industrieprodukt.

Für eigene Anwendungen ist eine Dimensionierungsvorschrift für kapazitiv

Tabelle 4

k	f _{G(unten)}	f _{G(oben)}	B/fo	C ₁ [pF]	C ₂ [pF]	L ₁ [µH]	L _{1s} [µH]	L _{1k} [µH]
0,99	0,0711	14,08	14,01	44903,2	226,783	56,12747	0,56127	55,5662
0,98	0,1009	9,908	9,81	31671,5	323,177	39,58530	0,79170	38,7936
0,97	0,1241	8,058	7,93	25794,2	398,880	32,23525	0,96705	31,2682
0,96	0,1439	6,965	6,82	22281,7	464,202	27,84052	1,11362	26,7269
0,95	0,1615	6,180	6,02	19878,5	523,117	24,83168	1,24158	23,5901
0,94	0,1778	5,515	5,34	18099,9	577,655	22,60319	1,35619	21,2470
0,93	0,1928	5,188	5,00	16714,0	629,020	20,86494	1,46054	19,4044
0,92	0,2070	4,825	4,62	15593,9	677,997	19,45848	1,55668	17,9018
0,91	0,2206	4,547	4,33	14663,8	725,121	18,28900	1,64600	16,6430
0,90	0,2333	4,280	4,05	13874,8	770,822	17,29544	1,72954	15,5659
0,85	0,2920	3,420	3,13	11178,7	986,354	13,88142	2,08222	11,7992
0,80	0,3443	2,908	2,56	9549,30	1193,66	11,78925	2,35785	9,53140
0,75	0,3930	2,545	2,15	8421,69	1403,61	10,31226	2,57806	7,73420
0,70	0,4398	2,273	1,83	7577,29	1623,70	9,17664	2,75299	6,42365
0,65	0,4848	2,062	1,58	6911,28	1860,73	8,25036	2,88762	5,36274
0,60	0,5289	1,890	1,36	6366,20	2122,07	7,46038	2,98415	4,47623
0,55	0,5724	1,748	1,18	5907,58	2416,74	6,76205	3,04292	3,71913
0,50	0,6141	1,628	1,01	5513,29	2756,64	6,12588	3,06294	3,06294
0,45	0,6558	1,524	0,87	5168,36	3158,44	5,53093	3,04201	2,48892
0,40	0,6966	1,434	0,74	4862,26	3646,70	4,96148	2,97689	1,98459
0,35	0,7373	1,356	0,62	4587,33	4259,67	4,40484	2,86315	1,54169
0,30	0,7774	1,288	0,51	4337,83	5060,80	3,85014	2,69510	1,15504
0,25	0,8164	1,227	0,41	4109,36	6164,04	3,28748	2,46561	0,82187
0,20	0,8538	1,171	0,32	3898,48	7796,97	2,70727	2,16582	0,54145
0,15	0,8914	1,122	0,23	3702,45	10490,3	2,09968	1,78473	0,31495
0,10	0,9280	1,077	0,15	3519,05	15835,7	1,45414	1,30873	0,14541
0,05	0,9640	1,036	0,07	3346,44	31791,1	0,75883	0,72089	0,03794

Tabelle 4: Wertetabelle für Breitband-Transformatoren nach Bild 10/Schaltung 2, normiert für 50 Ω und 1 MHz

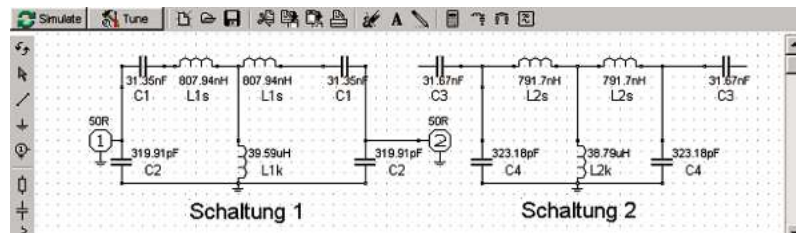


Bild 10: Diese Schaltungsvarianten liegen den Tabellen 3 und 4 zu Grunde

Anwendungsbeispiel:
Es wird ein Bandfilter auf nur einem Ringkern aus Pulverisen (Eingang 50 Ω Ausgang 300 Ω) für 7 MHz gebaut.
Eingabe:
untere Freq. = 6,5, obere Freq. = 7,5, Quelle = 50, Last = 300
Der Rechner gibt aus:
L1 = 4.64202, C1 = 132.629, C2 = 397.987, L2 = 27.9521, C3 = 22.1048, C4 = 66.3146, k = 0.142
Hier eine der erreichbaren **Durchlaufbandbreiten**. Der Pol ist beim praktischen Aufbau festzustellen, in der Simulation habe ich ihn nachgebildet. Das Filter ist breit genug zum Senden und schnell genug zur Unterdrückung der Oberwellen. Es entlastet den Empfangseingang, ersetzt aber nicht einen guten Präselektorf Durchlaufdämpfungslagen liegen unter -0,5 dB (bei Spulengüte 260 sogar unter -0,2 dB)

Bild 11: Java-Programm zur Berechnung von Bandfiltern mit einem Kern

kompensierte Breitbandübertrager (Bild 10) von Interesse. Diese liegt in Form der normierten Tabellen 3 und 4 vor. Sie beziehen sich auf 1 MHz/50 Ω. Alternativ dazu gibt es ein einfa-

ches Java-Programm [5] (Bild 11). Mit Leistungen hat der Verfasser nicht experimentiert. Für Ideen, Berichte über Nachbauten und Tests an der Antenne ist er dankbar. DGØSA