

Transformatoren bei Hochfrequenz unter der Lupe

Balune direkt am Sender - Ausgang

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

1.1 Der Balun am Senderausgang vor dem notwendigen Anpassnetzwerk.

Zur Auswahl stehen HF-Übertrager mit einem Übersetzungsverhältnis von 1:1 oder 1:4, wobei auch ein verlustarmer Guanella Übertrager 1:4 mit Leitungen in Anwendung kommen kann. Welche Impedanzen muss die nachfolgende symmetrische Anpassschaltung verarbeiten, wenn diese Varianten gewählt werden?

Die Frage wohin mit dem verlustbehafteten Balun wurde in dem gleichnamigen Beitrag ausführlich beantwortet. Der Balun – der Übergang von unsymmetrischer Sendeeinrichtung zur meist symmetrischen Antenne – gehört an den Ausgang des Anpassnetzwerks um geringe Verluste in der gesamten Antennenanlage zu haben.

Hat man sich entschlossen einen „voll symmetrischen Kopplern“ zu bauen, stellt sich natürlich die Frage nach der Ausführung des Balun. 1:1 als Luftübertrager, 1:4 als Wickelübertrager oder ein 1:4 Guanella mit Leitungen?

Bei den HF-Übertragern mit getrennten Wicklungen ist die primäre Induktivität von größter Bedeutung für die Verluste, sowie für die untere und obere Grenzfrequenz.

Der Balun muss daher genauer untersucht werden um optimale Verhältnis bzgl. der Verluste zu bekommen. In den folgenden Tabellen ist die Frequenz $f = 50$ MHz mit aufgeführt um zu zeigen wie sich die Verluste bei höheren Frequenzen bemerkbar machen.

Die Berechnung gestaltet sich sehr einfach. Man muss die wenigen Gleichungen über den HF-Übertrager durch die mathematische Mühle drehen, was ausführlich in den Beiträgen über „Balune für Kurzwellen“ geschehen ist.

Die Betrachtung vereinfacht sich dadurch, dass der Balun eingangsseitig breitbandig mit der Impedanz des Transceivers abgeschlossen ist, die heute fast immer zu 50 Ohm angegeben ist. Sendeanlagen mit Röhren haben im Anodenkreis ein Collins-Filter, das bei richtiger Einstellung der Kreiselemente auf 50 Ohm transformiert. Röhrensender sind daher immer mit einem 50 Ω Dummy Load auf maximale Ausgangsleistung abzustimmen bevor der Koppler an Stelle des Dummy Load angeschlossen wird. Die Einstellungen am Sender dürfen dann nicht mehr verändert werden.

Wir berechnen die Ausgangsimpedanzen der primär mit 50 Ω abgeschlossenen, verlustbehafteten Übertragers mit galvanisch getrennten Wicklungen. Der 1:1 Übertrager kann vorteilhaft als Luft-Übertrager ausgeführt werden, was beim 1:4 nicht so ohne Weiteres möglich ist, will man einen möglichst

hohen Koppelgrad k zwischen beiden Wicklungen haben.

1. Der 1:1 Balun als Luftübertrager

Frequenz F MHz	Ausgangsimpedanz 1:1 Balun mit Verlusten Ω	Verlust dB
1,9	14,39 + j 26,16	0,28
3,6	27,81 + j 63,51	0,33
7,15	39,72 + j 40,08	0,53
14,15	48,31 + j 58,59	0,95
21,2	54,00 + j 82,60	1,34
29,5	60,04 + j 111,03	1,76
50,0	74,32 # j 183,12	2,66

Tab.1.1: $Z_{out} = f(F)$, $k = 0,9$, $Q_L = 50$, $L_1 = 3 \mu H$, $R_o = 50 \Omega$

Optimiert man den 1:1 Übertrager nach Tab.1.1 Übertrager auf geringste Verlust ergeben sich folgende Werte für eine optimierte primäre Induktivität von $L_1 = 0,9 \mu H$

Frequenz F MHz	Ausgangsimpedanz 1:1 Balun mit Verlusten Ω	Verlust dB
1,9	2,00 + j 10,36	0,51
3,6	6,13 + j 18,06	0,33
7,15	16,77 + j 27,73	0,28
14,15	31,12 + j 34,24	0,37
21,2	38,03 + j 38,35	0,49
29,5	42,53 + j 44,23	0,64
50,0	49,05 + j 62,26	1,00

Tab.1.2: $Z_{out} = f(F)$, $k = 0,9$, $Q_L = 50$, $L_1 = 0,9 \mu H$, $R_o = 50 \Omega$

mit dem Nachteil, dass die Ausgangsimpedanzen im Realteil niederohmig werden. Hier stellt sich die Frage nach den Verlusten der nachfolgenden Anpassschaltung, denn diese muss diese niederohmigen Impedanzen auf die am Eingang der Antennenzuleitung vorhandenen übersetzen. Dabei gilt immer: Je mehr das Anpassnetzwerk „arbeiten“ muss umso größer sind die Verluste im Netzwerk.

2. Der 1:4 Balun

Der 1:4 Übertrager kann nicht ohne Weiteres als Luftübertrager ausgeführt werden. Es gibt aber die Möglichkeit ein Variometer einzusetzen, das einmal eingestellt in dieser Einstellung verharret. Als Beispiel sei das Variometer aus russischen Beständen erwähnt, das hervorragende HF-Eigenschaften hat, allerdings mit einer primären Induktivität von $L_1 = 12 \mu\text{H}$ und mit einem großen Induktivitätsbereich von $L = L_1 + L_2 \pm 2M$ und einem Koppelfaktor $k =$

Beim 1:4 Wickelübertrager mit Verlusten berechnen sich folgende Werte:

Frequenz F MHz	Ausgangsimpedanz 1: 4 Balun mit Verlusten Ω	Verlust dB
1,9	57,54 + j 104,65	0,28
3,6	111,23 + j 131,64	0,33
7,15	158,88 + j 160,33	0,53
14,15	193,22 + j 238,37	0,95
21,2	215,99 + j 330,41	1,34
29,5	240,15 + j 444,11	1,76
50,0	297,29 + j 732,49	2,66

Tab. 2.1: $Z_{\text{out}} = f(F)$, $k = 0,9$, $Q_L = 50$, $L_1 = 3 \mu\text{H}$, $R_o = 50 \Omega$

Die Optimierung des 1:4 Balun mit primären Abschluss $R_o = 50 \Omega$ auf geringste Verluste ergibt folgenden Werte:

Frequenz F MHz	Ausgangsimpedanz 1: 4 Balun mit Verlusten Ω	Verlust dB
1,9	7,98 + j 41,45	0,51
3,6	24,53 + j 72,18	0,33
7,15	67,06 + j 110,94	0,28
14,15	124,48 + j 136,96	0,37
21,2	152,13 + j 153,41	0,49
29,5	170,13 + j 176,91	0,64
50,0	196,22 + j 249,06	1,00

Tab. 2.2: $Z_{\text{out}} = f(F)$, $k = 0,9$, $Q_L = 50$, $L_1 = 0,9 \mu\text{H}$, $R_o = 50 \Omega$

Nicht berücksichtigt sind die Verluste im Ringkern. Auch muss überprüft werden ob bei den üblichen Leistungen der Kern nicht in die Sättigung geht und dann nichtlineare Effekte das Sendesignal beeinflussen. Das ist der Vorteil von Luft-Übertragern oder dem Variometer. Diese haben keine Sättigungs-Effekte und bleiben auch bei großen Leistungen immer linear.

3. Der 1:1 Balun als Variometer

Welche Impedanzen stellen sich bei dem oben erwähnte Variometer ein?

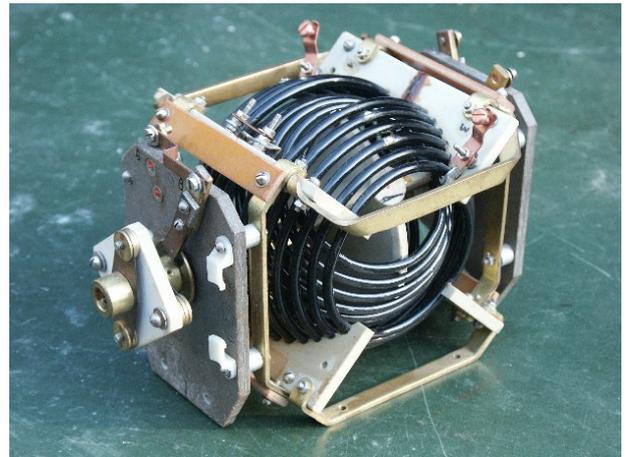


Bild 3.1: Variometer aus russischen Sendern in optimaler Ausführung $k = 0,916$

Die Messung des russischen Variometers nach Bild 1 ergab als primäre Induktivität $L_1 = 12 \mu\text{H}$ (Sekundärkreis offen), $L_{\text{min}} = 2 \mu\text{H}$ und $L_{\text{max}} = 46 \mu\text{H}$. Daraus wird $M = 11 \mu\text{H}$ und $L_2 = 12 \mu\text{H}$, in diesem Fall identisch mit L_1 . Je nach Winkelstellung wird entweder eine Gesamtinduktivität $L_{\text{min}} = 2 \mu\text{H}$ oder $L_{\text{max}} = 46 \mu\text{H}$ erreicht. Da nur „Draht“ für $24 \mu\text{H}$ vorhanden ist und maßgeblich für die Verluste steht, haben wir eine verlustlose Zusatzinduktivität von $24 \mu\text{H}$ erzeugt.

Man kann die mit einander verkoppelten Induktivitäten auch parallel schalten und erhalten eine Gesamtinduktivität

$$L_{\text{ges}} = [L_1 L_2 - M^2] / [L_1 + L_2 - 2M] \quad (\text{Gl.3.1})$$

Der Koppelgrad ist ($L_1 = L_2$)

$$k = M / L_1 \quad (\text{Gl.3.2})$$

Mit (Gl.3.1) und (Gl.3.2) erhalten wir

$$L_{\text{ges}} = \frac{1}{2} L_1 (1 - k) \quad (\text{Gl.3.3})$$

mit $0 \leq k \leq 1$

und einem Wertebereich des Variometers zwischen $0 \leq L_1 \leq 6 \mu\text{H}$. Man kann also einen Wert von $L_{\text{ges}} = 0,9 \mu\text{H}$ einstellen.

Bei der Parallelschaltung beider Induktivitäten des Variometers verringert sich der von der Frequenz abhängige Verlustwiderstand auf die Hälfte und entsprechend (Gl.3.3) auch die Induktivität auf die Hälfte.

Der Verlustwiderstand ist unabhängig von der Winkelstellung, obwohl sich der Induktivitätswert je nach Winkel ändert. Die Güte reduziert sich bei gleichen Spulen auf die Hälfte.

Zwischen Gesamtinduktivität und Koppelfaktor besteht ein fester Zusammenhang nach (Gl.3.3), d.h. bei bekannter Induktivität des Variometers ist damit auch der Koppelfaktor k festgelegt.

Frequenz F MHz	Ausgangsimpedanz 1:1 Variometer als Balun mit Verlusten Ω	Verlust dB
1,9	2,01 + j 10,41	1,08
3,6	6,16 + j 18,73	0,71
7,15	15,80 + j 29,32	0,61
14,15	29,86 + j 39,93	0,76
21,2	37,50 + j 48,18	0,99
29,5	43,38 + j 58,76	1,27
50,0	53,62 + j 87,64	1,91

Tab.3.1: $Q = 25$, $L = 0,9 \mu\text{H}$ und daraus $k = 0,85$

Frequenz F MHz	Ausgangsimpedanz 1:1 Variometer als Balun mit Verlusten Ω	Verlust dB
1,9	2,98 + j 13,64	0,98
3,6	8,62 + j 23,80	0,70
7,15	19,40 + j 36,09	0,70
14,15	31,86 + j 52,44	0,98
21,2	38,45 + j 68,75	1,31
29,5	44,12 + j 89,40	1,69
50,0	55,53 + j 142,70	2,52

Tab.3.2: $1,2 \mu\text{H}$ und daraus $k = 0,8$

F MHz	Ausgangsimpedanz 1:1 Variometer als Balun mit Verlusten Ω	Verlust dB
1,9	4,95 + j 22,00	1,01
3,6	11,93 + j 35,47	0,89
7,15	20,81 + j 60,98	1,12
14,15	29,66 + j 107,60	1,77
21,2	35,74 + j 155,73	2,37
29,5	42,23 + j 214,02	3,01
50,0	57,40 + j 358,48	4,27

Tab.3.3: $L_{\text{ges}} = 2\mu\text{H}$ entsprechend $k = 2/3$, $Q = 25$

Wie Tabelle 3.3 zeigt, steigen bei einer eingestellten Induktivität auf $L_{\text{ges}} = 2\mu\text{H}$ die Verluste schon enorm an.

Wird das im Bild gezeigte Variometer als Balun verwendet, sollte der eingestellte Induktivitätswert L_{ges} daher nicht über $L_{\text{ges}} = 1,2 \mu\text{H}$ liegen! Wie sich zeigen wird ist das Variometer als Balun direkt am Senderausgang nicht geeignet.

Wird der Balun direkt am Senderausgang angeordnet folgt eine symmetrische Anpassschaltung die als Impedanzpuffer die komplexen Ausgangsimpedanzen der Balun an die komplexen Impedanzen am Eingang der Zuleitung zur Antenne anpassen muss. Bei richtiger Abstimmung der Antennenanlage am Eingang des Balun auf $S = 1$ ist bis rauf zur Antenne an jeder Stelle immer konjugiert komplexe Anpassung vorhanden.

Als Anpassschaltung ist eigentlich nur ein LC-Netzwerk sinnvoll. Es ist eindeutig in der Abstimmung und hat die geringsten Verluste aller bekannten Anpassnetzwerke. Pi – und T-Filter scheiden wegen der unendlich einstellbaren Abstimmöglichkeiten aus.

Besonders beim T-Koppler kann eine falsche Einstellung von L und C zu enorm hohen Verlusten führen. Dann bleibt die gesamte HF-Leistung im Koppler. Das immer dann der Fall, wenn das antennenseitige C klein wird – d.h. die Antenne vom Koppler entkoppelt ist.

Auch beim zum T-Glied dualen Pi-Filter gibt es unendlich viele „richtige“ Einstellungen. Bezüglich der Verluste kehren sich die Verhältnisse um. Bei großem Kapazitätswert des antennenseitigen Kondensators – der immer wieder (leider) in der Literatur empfohlen wird – bleibt ein Großteil der teuer erzeugten HF im Koppler. Das antennenseitige C sollte in der Nähe von 400 pF liegen und nicht

größer gewählt werden. Man kann beim Pi-Filter ohne Weiteres mit einem Festkondensator arbeiten und erleichtert sich damit die fummelerei bei der Abstimmung. Größere Werte „klatschen“ die HF gegen Masse ab, was wohl sofort einsichtig ist.

3. Die Verluste im LC- Impedanzpuffer

Die Ausgangsimpedanzen der Balune wurden oben berechnet und sind damit bekannt. Was nicht bekannt ist, sind die Fußpunktimpedanzen am Eingang der Hühnerleiter. Egal ob ein symmetrischer oder a-symmetrischer Koppler verwendet wird, die Verluste sind gleich und nur abhängig von der Qualität der verwendeten Spulen, wenig von den Kondensatoren, da diese eine hohe Güte haben. Während die Güte der verwendeten Spulen selten über 100 liegt. Wir rechnen mit einer Spulengüte von $Q_L = 100$ und einer in den Beiträgen über „Balune für Kurzwellen, Teil 2“ angedachten Referenz-Antennenanlage mit Dipol 2 x 27 m über leitendem Grund mit Verlusten und einer 15 m langen Hühnerleiter 600 Ω . Die Impedanzen und Verluste auf der Zweidraht- Leitung sind wie folgt: Dipol 2 x 27 m, Hühnerleiter 600 Ω , $l = 15$ m

F MHz	Impedanz am Eingang Hühnerleiter Ω	Verluste auf der Hühnerleiter $l = 15$ m dB
1,9	530 + j 752	0,024
3,6	446 - j 1622	0,018
7,15	5650 - j 302	0,133
14,15	596 - j 795	0,056
21,2	283 - j 586	0,091
29,5	110 - j 37	0,152

Tab. 3.1

Das LC-Anpassnetzwerk hat also die „Aufgabe“ die Impedanzen nach Tab. 3.1 auf die Impedanzen des Balun umzusetzen. Durch die Transformation entstehen Verluste, vor allem in den verwendeten Spulen im LC-Netzwerk.

F MHz	1 : 1 Balun Verlust dB	LC dB	Summe dB
1,9	0,28	1,01	1,29
3,6	0,66	1,36	2,02
7,15	1,02	1,08	2,10
14,15	1,73	0,49	2,22
21,2	2,36	0,31	2,67
29,5	3,02	0,07	3,09

Tab.3.2: $k = 0,9$, $Q_L = 50$, $L_1 = 3 \mu\text{H}$

F MHz	1 : 1 Balun Verlust dB	LC dB	Summe dB
1,9	0,51	1,41	1,92
3,6	0,33	1,74	2,07
7,15	0,28	0,92	1,20
14,15	0,37	0,35	0,72
21,2	0,49	0,29	0,78
29,5	0,64	0,06	0,70

Tab.3.3: $k = 0,9$, $Q_L = 50$, $L_1 = 0,9 \mu\text{H}$

Beim 1:4 Wickelübertrager mit Verlusten berechnen sich folgende Werte:

F MHz	1 : 4 Balun Verlust dB	LC dB	Summe dB
1,9	0,28	0,28	0,56
3,6	0,33	0,36	0,69
7,15	0,53	0,31	0,84
14,15	0,95	0,13	1,08
21,2	1,34	0,11	1,45
29,5	1,76	0,14	1,90

Tab. 3.4: $k = 0,9$, $Q_L = 50$, $L_1 = 3 \mu\text{H}$

F MHz	1 : 4 Balun Verlust dB	LC dB	Summe dB
1,9	0,51	0,75	1,26
3,6	0,33	0,80	1,13
7,15	0,28	0,48	0,76
14,15	0,37	0,17	0,54
21,2	0,49	0,14	0,63
29,5	0,64	0,12	0,76
50,0	1,00	-	-

Tab. 3.5: $k = 0,9$, $Q_L = 50$, $L_1 = 0,9 \mu\text{H}$

Mit Blick auf die Werte des 1:1 Wickelübertragers in Tab.3.2 und 3.3 zeigt sich das die Verluste viel zu hoch sind. Ein 1:1 Balun direkt am Senderausgang ist daher immer die falsche Lösung.

Wenn unbedingt einem symmetrischen Koppler der Vorzug gegeben wird, warum auch immer, dann darf nur ein 1:4 an dieser Stelle eingesetzt werden, mit den unter Tab.3.4 angegebenen Daten.

Berechnen wir noch zum Abschluss des Beitrages das Variometer, dann zeigen sich folgende Daten: (Zur Erinnerung: die beiden Induktivitäten sind gekoppelt und parallel geschaltet)

Frequenz F MHz	Verlust 1: 1 Variometer als Balun dB	LC dB	Summe dB
1,9	1,08	1,47	2,55
3,6	0,71	1,68	2,39
7,15	0,61	0,98	1,59
14,15	0,76	0,37	1,13
21,2	0,99	0,31	1,30
29,5	1,27	0,07	1,34
50,0	1,91	-	-

Tab.3.5: Q = 25, L_{ges} = 0,9 µH und daraus k = 0,85

Frequenz F MHz	Verlust 1: 1 Variometer als Balun dB	LC dB	Summe dB
1,9	0,98	1,21	2,19
3,6	0,70	1,35	2,05
7,15	0,70	0,90	1,60
14,15	0,98	0,36	1,34
21,2	1,31	0,13	1,44
29,5	1,69	0,07	1,78
50,0	2,52	-	-

Tab.3.6: L_{ges} = 1,2 µH und daraus k = 0,8, Q=25

Frequenz F MHz	1: 1 Variometer als Balun Verlust dB	LC dB	Summe dB
1,9	1,01	0,94	1,95
3,6	0,89	1,17	2,06
7,15	1,12	0,85	1,97
14,15	1,77	0,37	2,14
21,2	2,37	0,31	2,68
29,5	3,01	0,07	3,08

Tab.3.7: L_{ges} = 2µH und daraus k = 2/3, Q = 25

Das Variometer direkt am Senderausgang scheidet wegen der großen Verluste hier als Balun aus. Als Balun zwischen einem unsymmetrischen Anpassnetzwerk und Hühnerleiter ist es ideal geeignet /7/.

4. Ströme, Spannungen und Leistungen im Balun und Koppler

Gehen wir von einem 1:4 Balun am Senderausgang mit L1 = 0,9 µH aus, dann können wir den HF-Strom sofort übersehen.

Bei Abstimmung auf S = 1 ist die Eingangsimpedanz reell und 50 Ω. Bei der erlaubten Leistung von P = 750 W berechnet sich der Eingangsstrom aus der Beziehung P = I²*R zu I = 3,87 A und die Spannung U = 193,6 V.

Nach Tab. 3.4 ist bei der Frequenz f = 3,6 MHz eine Gesamtdämpfung von Balun und LC-Netzwerk von D = 0,69 dB vorhanden, entsprechend einem linearen Faktor d = 1,172. Im Balun und Anpassnetzwerk werden daher P_v = 110 Watt in Wärme gewandelt.

Am Eingang der Hühnerleiter stehen also P_{out} = 640 W zur Verfügung. (gerundet) Die Eingangsimpedanz der Hühnerleiter nach Tab.3.1 ist bei f = 3,6 MHz, Z = (446 – j 1622) Ω. Bei konjugiert komplexer Anpassung hat der Ersatzgenerator (in Richtung Sender gesehen) eine Impedanz von Z = (446 + j 1622) Ω. Daraus berechnet sich ein Reflexionsfaktor r = 0, wie es auch sein muss.

Mit den Daten der Tab.3.1 (f = 3,6 MHz) fließt hier ein Antennenstrom von I_{ant} = 1,197 A und die Spannung am Eingang der Hühnerleiter U = 534 V. Die Dämpfung auf der HL ist D = 0,018 dB (Tab.3.1). Die Leistung oben an der Antenne daher P = 640 W / 1,004 = 637,35 W. Bei einem Antennengewinn von L = 6 dBi werden immerhin P = 2537 W abgestrahlt.

Der Nachteil dieser Anordnung des Balun 1:4 direkt am Senderausgang ist der, dass das Anpassnetzwerk „hoch“ liegt und keine Verbindung zu Masse haben darf. Ob das LC-Netzwerk symmetrisch oder asymmetrisch ausgeführt wird ist Geschmacksache. Symmetrisch sieht in der Schaltungsdarstellung ansprechender aus, notwendig ist es nicht und der HF ist es egal.

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

Literatur:

- /1/ Der Spartransformator, DL3LH
- /2/ Gekoppelte Spulen, DL3LH
- /3/ LC-Anpassung, DL3LH
- /4/ Langdrahtantennen, DL3LH
- /5/ Gekoppelte Kreise, DL3LH
- /6/ Gekoppelte Spulen und Kreise, DL3LH
- /7/ Das Variometer im KW Bereich, 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.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.