2018

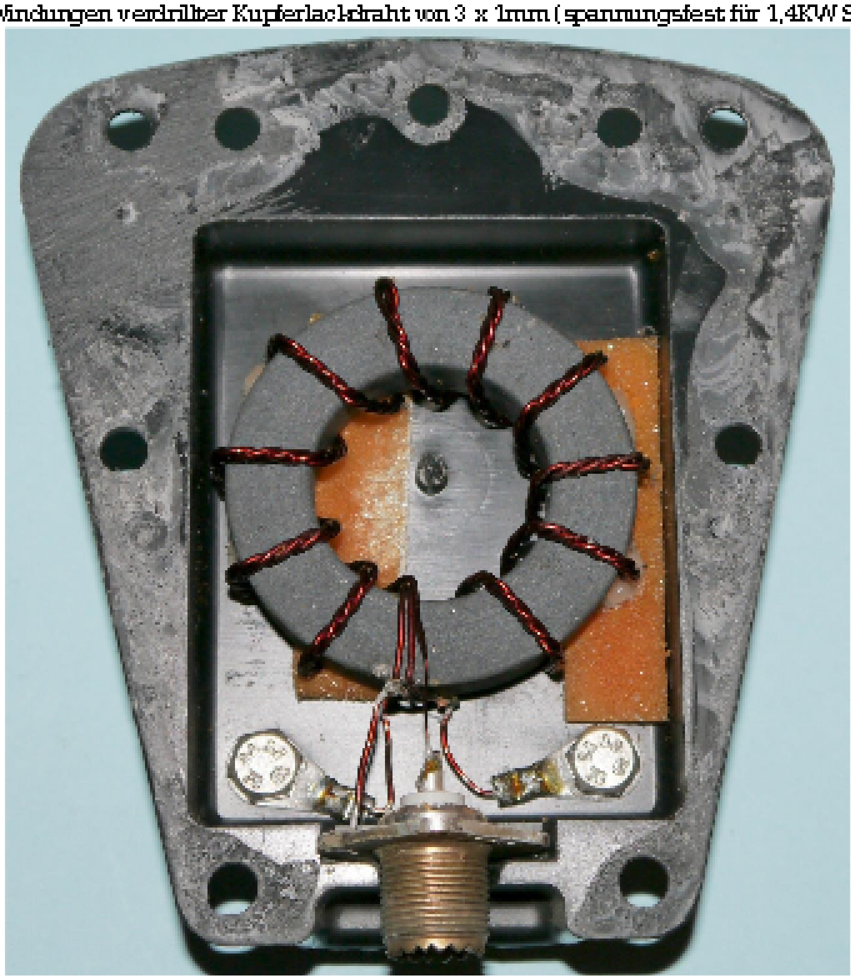
Mythos FD 4

Berechnung der Verluste einer FD 4 Antennenanlage bei Verwendung des Balun direkt an der Antenne

Dr.rer.nat.Schau
Institut für Umwelttechnik, Nonnweiler - Saar
10.05.2018

Balun für die Anwendung direkt an der Antenne

Inneransicht von einem Fritzel Balun 1:1 AMA Serie 83 FR1012 (Spannungsbalun)
11 Windungen verdrillter Kupferlackdraht von 3 x 1mm (spannungsfest für 1,4KW SSB?)



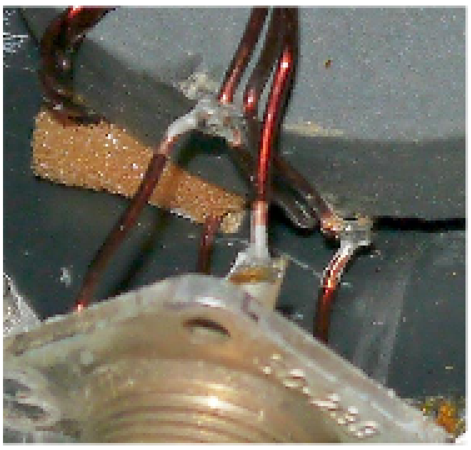


Bild links:
Lötstellen direkt am Balun ohne Kernisolierung.

Das alles für 750W CW oder 1,4KW SSB ???

Da der bewickelte Kern kleiner ist als der Platz von innen, wackelt er im Gehäuse wenn der Schaumstoff zerbröselt. Dies kann auf Dauer zu Drahtbruch führen.

Die Ein- u. Ausgangsinduktivität beträgt rund 100µH. Der Balun hat somit auf 1,8MHz einen induktiven Blindwiderstand von gut 1KΩ.

Der Kern dürfte ein FT240-61 o.ä. sein. AL=200

Es wäre zu schön, wenn Balungehäuse durchsichtig wären ...

Bildhinweis http://www.baeckerei-heitmann.de/DF1BT/So-sieht-ein-Fritzel-Balun-1zu1-von-Innen-aus.pdf

Berechnung einer Antennenanlage mit einer FD4 - Antenne

Der anfangs im Bild dargestellte Balun ist für die Verwendung direkt an der Antenne vorgesehen. Mit einer Induktiviät auf dem Ringkern von L = 100 µH ist der Balun lt. Angabe für eine Leistung von P = 1400 W PEP.
Wir machen uns die Mühe diesen Balun zu berechnen und wollen damit die Frage beantworten, wie sinnvoll es ist einen Balun direkt an der Antenne zu betreiben.

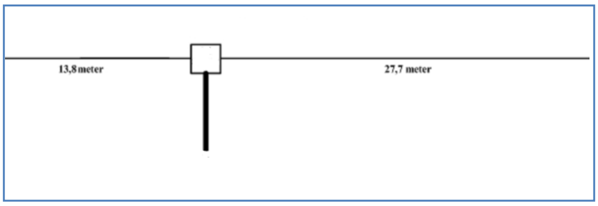


Bild 1 Eine FD4-Antenne für Amateurzwecke

Das Bild 1 zeigt die typische Antwendung für einen Balun an einer FD 4 Antenne, der für viel Geld von bekannten Firmen für Amateurfunk-bedarf angeboten wird.
Die Antenne wird unsymmetrisch eingespeist, wobei der kürze Antennenschenkel eine Länge von 13,8 m und der längere eine Länge von 27,7 m hat. Zwischen beiden Antennenhälften ist der Balun eingefügt, der durch eine Koaxleitung beliebger Länge gespeist wird. Die Antenne ist für die Bänder 80 – 10 m vorgesehen.

Im ersten Schritt berechnen wir die Fußpunkt-impedanzen der Antenne

Frequenz MHz	Impedanz Ohm	Gewinn dB
3,65	54 + j 131	8,06
7,15	121 + j 74	6,85
14,15	179 – j 118	6,36
21,20	3089 – 242	4,87
29,50	255 + j 351	5,46
29,50	255 + j 351	5,46

Tab. 1 Fußpnnktimpedanzen einer FD4-Antenne

Nun berechnen wir was ein 1:1 Balun aus diesen Impedanzen macht und welchen Verlust dieser hat.
Danach berechnen wir die Verluste des speisenden Koaxkabels.

Frequenz MHz	Impedanz Ohm	Verlust dB
3,65	118 + j 539	4,8
7,15	172 + j 302	4,3
14,15	474 + j 1604	5,04
21,20	2911 + j 3009	0,78
29,50	858 + j 3816	6,35

Tab.2: Impedanzen am Eingang des Balun $Q_L = 50$, k = 0,9

Frequenz MHz	Impedanz Ohm	Verlust dB
3,65	4,16 + j 38	4,33
7,15	5,8 – j 15	1,86
14,15	17 + j 98	9.2
21,20	6,6 - j 40	9,83
29,50	190 + j 256	15,18

Tab. 3 Verluste des verlustarmen 50 Ω Kabels RG 213 der Länge L = 20 m mit den Impedanzen nach Tab. 4.2 und die Impedanzen am Eingang des Kabels

Gesamtverluste ist die Summe der Spalten 3 der Tabellen 2 und 3.
Wir können daher bestätigen, dass der Balun für P = 1400 W geeignet ist, denn mit diesen Dämpfungen von rund 10 dB kommen von 750 Watt Leistung des Senders nur etwa P = 75 Watt am Balun an.
Jeder Kommentar zu dieser Einspeisung einer FD 4 erübrigt sich.

Was kann man besser machen?

1. Die FD 4 und ähnliche Anordnunge und auch so genannte Stromsummenantennen vermeiden. Besser ist eine Langdrahtantenne mit der Einspeisung am Anfang bzw. Ende der Antenne.

2. Wenn möglich einen nicht resonanten Dipol verwenden. Ein Dipol mit 2 x 27 m hat eine optimale Länge für geringste Verluste für alle Bänder mit Einspeisung eine Hühnerleiter.

3. Balun mit etwa 5uH primärer Induktivität direkt am Einang der Hühnerleiter gewährleisten geringste Verluste.

4. Eine einfache LC-Anordnung als Anpass – netzwerk zur Anpassung an den Innenwiderstand des Senders. Siehe dazu /1/

1. Grundlagen

Die allgemeinen Gleichungen des Transformators mit seinen Ein- und Ausgangsklemmen beschreiben einen Vierpol. Diese Vierpol-gleichungen eines allgemeinen, linearen Vierpols, wie die des HF-Transformators und auch des Balun, beinhalten vier komplexe Vierpolparameter deren Frequenzabhängigkeit durch Ortskurven näher beschrieben werden kann.
Der Transformator hat eine Primär- und eine Sekundärwicklung. Sind beide Wicklungen gleicher Windungszahl haben wir einen 1:1 Transformator, ist die Anzahl der Windungen ungleich haben wir einen 1: N Transformator.

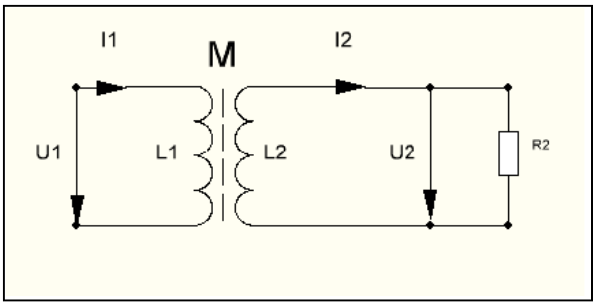


Bild 1.1: Schaltbild des allgemeinen Transformators mit Angabe der Strom und Spannungs -richtungen

Mit Blick auf Bild 1, sinusförmige Vorgänge vorausgesetzt, gelten die allgemeinen Gleichungen des Transformators

$$U_1 = j\,\omega\, L_1\, I_1 - j\,\omega\, M\, I_2 \qquad \text{(Gl.1.1)}$$

$$U_2 = j\,\omega\, M\, I_1 - j\,\omega\, L_2\, I_2 \qquad \text{(Gl.1.2)}$$

in dem die Gegeninduktivität M mit dem Koppelfaktor k in folgender Beziehung steht

$$k = M / \sqrt{}\, L_1 * L_2 \qquad \text{(Gl.1.3)}$$

der alle Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann, wobei k = 1 eine vollständige Koppelung zwischen primärer und sekundärer Wicklung beschreibt.

Nach Bild 1.1 gilt, mit den gewählten Richtungen für Strom und Spannung an der Last, der Zusammenhang

$$U_2 = I_2\, R_2 \qquad \text{(Gl.1.4)}$$

eingesetzt in (Gl.1.2)

folgt

$$I_2 = (j\omega M)\, I_1 / (R_2 + j\,\omega\, L_2)$$

$$= j\omega L_1 + (\omega M)^2 / (R_2 + j\omega L_2) \qquad \text{(Gl.1.6)}$$

und für k = 1, $(L_1 = L_2 = M)$ gilt

$$Z_{in} = j\omega L_1 + (\omega L_1)^2 / (R_2 + j\omega L_1) \qquad \text{(Gl.1.7)}$$

Wir teilen (Gl.1.7) nach Real – und Imaginärteil auf und erhalten

$$Z_{in} = R_2\, (\omega L_1)^2/N + j\omega L_1[(1- (\omega L_1)^2/N) \qquad \text{(Gl.1.8)}$$

mit dem Nenner

$$N = [(R_2^2 + (\omega\, L_1)^2]. \qquad \text{(Gl.1.9)}$$

Die komplexe Eingangsimpedanz allgemein ist

$$Z_{in} = R_{in} + j\, X_{in} \qquad \text{Gl.1.10)}$$

und der Realteil nach (Gl.1.8) für k < 1

$$R_{in} = R_2\, (\omega M)^2 / [(R_2^2 + (\omega\, L_1^2] \qquad \text{(Gl.1.11)}$$

sowie der Imaginärteil

$$X_{in} = \omega L_1 - (\omega M)^2\, \omega L_1 / [(R_2^2 + (\omega L_1)^2]. \qquad \text{(Gl.1.12)}$$

Der Ausdruck

$$(\omega M)^2 / [(R_2^2 + (\omega\, L_1^2] = ü^2 \qquad \text{(Gl.1.13)}$$

wird mit Übersetzungsverhältnis $ü^2$ bezeichnet.
Aus (Gl.1.11) wird dann

$$R_{in} = R_2\, ü^2 \qquad \text{(Gl.1.14)}$$

und aus (Gl.1.12) wird

$$X_{in} = \omega L_1 - ü2\ \ \omega L_2. \qquad \text{(Gl.1.15)}$$

bzw. mit $L_1 = L_2$ und k = 1

$$X_{in} = \omega L_1 - ü^2 * \omega L_1 = \omega L_1\, (1 - ü^2) \qquad \text{(Gl.1.16)}$$

Das als Übersetzungsverhältnis definierte ü ist abhängig von der Gegeninduktivität, der sekundären äußeren Beschaltung und von den Verlustwiderständen im Übertrager.

Nach (Gl.1.11) erhöht sich der ohmsche Widerstand der Eingangsimpedanz bei Belastung des Übertragers. Der induktive Blindwiderstand ωL_1 verringert sich. D.h. der Phasenwinkel wird verkleinert und der Übertrager kann mehr Leistung aufnehmen, entsprechend der Lenz`schen Regel, das die Wirkung immer die Ursache schwächt.

Die Grenze für die $X_{in} = \omega L_1 - X_2 = 0$ wird ist (k = 1)

$$X_2 = ½ \omega M - \sqrt{[¼ (\omega M)^2 - R_2^2]} \qquad \text{(Gl.1.7)}$$

Eine wichtige Größe ist das Verhältnis der Spannung am Lastwiderstand U_2 zur Eingangs-spannung U_1
Mit den (Gl.1.1), (Gl.1.2) und (Gl.1.4) berechnet sich

$$U_2/U_1 = M / [L_1 + j\omega/R_2 (L_1L_2 - M^2)] \qquad \text{(Gl.1.8)}$$

und für mit $L_1 = L_2$ und k = 1 wird daraus

$$U_2/U_1 = M / L_1. \qquad \text{(Gl.1.9)}$$

Mit der allgemeinen Beziehung für die Induktivität und Gegeninduktivät

$$L_1 = w_1^2 A_L \qquad \text{(Gl.1.10)}$$

und

$$M = w_1 * w_2 A_L \qquad \text{(Gl.1.11)}$$

wird aus (Gl.1.9)

$$U_2/U_1 = (w_2 / w_1) = 1 \qquad \text{(Gl.1.12)}$$

d.h. das bei einem verlustlosen Übertrager ohne Streuung bei fester Primärspannung U_1, die sekundäre Spannung unabhängig ist von der Belastung, also unabhängig von der Größe des Lastwiderstandes R_2.

Jeder Übertrager hat eine untere und obere 3 dB Grenzfrequenz, die sich für den verlustlosen Fall und gleicher Anzahl von Windungen primär und sekundär $w_2 = w_1$ berechnet zu

$$f_u = R_1 / (4 \pi L_1) \qquad \text{(Gl.1.18)}$$

und

$$f_o = R_1 / (L_1 * \sigma) \qquad \text{(Gl.1.19)}$$

mit der Streuung

$$\sigma = 1 - k^2. \qquad \text{(Gl.1.20)}$$

Für den Übertrager mit Verlusten müssen die (Gl.1.18) und (Gl.1.19) durch die Verlustwiderstände ergänzt werden.

2. Der 1:1 Übertrager mit Verlusten

Beim verlustbehafteten Übertrager müssen die frequenzabhängigen Verlustwiderstände der Primär- und Sekundärwicklung berücksichtigt werden. Das ist sehr einfach, indem man (Gl.1.6) durch die Verlust-Widerstände ergänzt.

$$Z_{in} = (r_1 + j\omega L_1) + (\omega M)^2 / (R_2 + r_2 + j\omega L_2). \qquad \text{(Gl.2.1)}$$

Bei $\omega M = 0$ ist die Eingangsimpedanz

$$Z_{in} = (r_1 + j\omega L_1)$$

was auch sofort verständlich wird, denn eine Kopplung zwischen Primär- und Sekundär-Wicklung fehlt vollständig.

Die frequenzabhängigen Verlustwiderstände $r_{1,2}$ sind der Güte der Spulen zugeordnet. Je größer die Güte umso kleiner die Verlustwiderstände.

3. Der 1:4 Übertrager mit Verlusten

Beim verlustbehafteten Übertrager müssen die frequenzabhängigen Verlustwiderstände der Primär- und Sekundärwicklung berücksichtigt werden. Das ist sehr einfach, indem man (Gl.1.6) durch die Verlust-Widerstände ergänzt.

$$Z_{in} = (r_1 + j\omega L_1) + (\omega M)^2 / (R_2 + r_2 + j\omega L_2). \qquad \text{(Gl.3.1)}$$

Bei $\omega M = 0$ ist die Eingangsimpedanz

$$Z_{in} = (r_1 + j\omega L_1)$$

Wie oben beschrieben. Mit der allgemeinen Beziehung für die Induktivität

$$L_1 = w_1^2 A_L \qquad \text{(Gl.3.2)}$$

hat die sekundäre Induktivität den 4 fachen Wert der primären und der Verlustwiderstand der Sekundärwicklung ist um den Faktor 4 größer.

Aus (Gl.3.1) wird

$Z_{in} = (r_1 + j\omega L_1) + (\omega M)^2 / (R_2 + 4r_1 + j4\omega L_1)$. (Gl.3.3)

Der Koppelfaktor berechnet sich damit zu

$$k = M / \sqrt{L_1 * L_2} = M / (2L_1) \quad (Gl.3.4)$$

bzw.

$$(\omega M)^2 = (2 * k \ \omega L_1)^2 \quad (Gl.3.5)$$

Wir teilen (Gl.3.3) auf nach Real- und Imaginärteil und erhalten den
Realteil

$$R_{in} = r_1 + (2k\omega L_1)^2 * (R_2 + 4r_1) / N \quad (Gl.3.6)$$

und den Imaginärteil

$$X_{in} = \omega L_1 - (2k\omega L_1)^2 * (4\omega L_1) /N \quad (Gl.3.7)$$

mit dem Nenner

$$N = [(R_2 + 4r_1)^2 + (4\omega L_1)^2]. \quad (Gl.3.8)$$

Die frequenzabhängigen Verlustwiderstände $r_{1,2}$ sind der Güte der Spulen zugeordnet. Je größer die Güte umso kleiner die Verlustwiderstände.

Das Übersetzungsverhältnis $ü^2$, entsprechend (Gl.1.13), hat dann folgendes Aussehen

$$ü^2 = (2k\omega L_1)^2 / [(R_2 + 4r_1)^2 + (4\omega L_1)^2] \quad (Gl.3.9)$$

und daraus

$$R_{in} = r_1 + ü^2 * (R_2 + 4r_1) \quad (Gl.3.10)$$

$$X_{in} = \omega L_1 - ü^2 * (4\omega L_1) \quad (Gl.3.11)$$

Mit (Gl.3.10) und (Gl.3.11) berechnet sich wieder der Strom I_1, dann mit ü der Strom I_2 und daraus in bekannter Weise die ohmschen Gesamtverluste im primären und sekundären Verlustwiderstand r_1 und $r_2 = 4 * r_1$.

Die **Ausgangsimpedanz** des 1:4 Übertragers ergibt sich analog zu (Gl.3.1)

$Z_{out} = (r_2 + j\omega L_2) + (\omega M)^2 / (R_1 + r_1 + j\omega L_1)$

(Gl.3.12)

und mit (Gl.3.5) und obigen Überlegungen wird

$$R_{out} = 4 r_1 + (2k\omega L_1)^2 * (R_1 + r_1) / N \quad Gl.3.13)$$

und den Imaginärteil

$$X_{in} = 4\omega L_1 - (2k\omega L_1)^2 * (\omega L_1) /N \quad (Gl.3.14)$$

mit dem Nenner

$$N = [(R_1 + r_1)^2 + (\omega L_1)^2]. \quad (Gl.3.15)$$

Das Übersetzungsverhältnis $ü^2$, entsprechend (Gl.1.13), hat dann folgendes Aussehen

$$ü^2 = (2k\omega L_1)^2 / [(R_1 + r_1)^2 + (\omega L_1)^2] \quad (Gl.3.16)$$

und daraus

$$R_{out} = 4 r_1 + ü^2 * (R_1 + r_1) \quad (Gl.3.17)$$

$$X_{out} = 4 \omega L_1 – ü^2 * (\omega L_1) \quad (Gl.3.18)$$

Beim 4 :1 Übertrager werden Ein- und Ausgang vertauscht. Es gelten die Gleichungen (Gl.3.11) bis (Gl.3.18).

Die Stromübersetzung I_2/I_1berechnet sich aus (Gl.1.2)

$$U_2 = j \omega M I_1 - j \omega L_2 I_2 \quad (Gl.3.19)$$

Mit der komplexen Last

$$Z_2 = (R_2 + r_2) + j (\omega L_2 \pm X_2) \quad (Gl.3.20)$$

und dem Zusammenhang $U_2 = I_2 * Z_2$
und daraus das Qudrat der Stromübersetzung

$$(I_2/I_1)^2 = (2 k \omega L_1)^2/[(R_2+4r_1)^2 + (X_2 – 4 \omega L_1)^2]$$

unter Verwendung $r_2 = 4 r_1$ und $\omega M = 2 k \omega L_1$ mit $L_2 = 4 L_1$ für die Berechnung der Verluste.

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

/1/ Die Antenne macht die Musik

/2/ www.gutachten-emvu.jimdo.com