

# **Balune für Kurzwellen**

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

Dieser Beitrag  
ist einem legendären  
Funkamateurl  
und Freund  
Günter Camps, Kiel  
DL1JD †  
ex D4xdv  
gewidmet

## Vorwort:

Damals in den 60 er Jahren hat der „Oldtimer alter Schule“ und Kriegslizenzinhaber Günter Camps in der Ringstrasse in Kiel einen legendären Sender aus Wehrmachtbeständen, den Lo40K39 betrieben. Die Antennenanlage war ein Dipol mit Hühnerleiter als Verbindung zwischen Sender und Antenne. Dabei stellte sich die Frage nach der Anordnung des notwendigen Balun zum Übergang von Symmetrisch zu Unsymmetrisch. Wir haben viel über diese Frage diskutiert, konnten sie letztendlich damals aber nicht klären, weil die Kenntnisse der Ing. Schule Kiel, nicht ausreichend waren um die Frage rechnerisch zu bearbeiten. Selbst Antworten von gestandenen Funkamateuren auf diese Frage waren reine Spekulation.

Aus Überlieferung wurde, damals wie heute, meist eine resonante Antenne gewählt und mit Koaxkabel eingespeist. Die Symmetrierung, d.h. der Übergang von dem über Erde symmetrischen Dipol auf den unsymmetrischen Senderausgang wurde übergangen oder nicht beachtet. Die Antenne „schielt“ ein wenig war die lapidare Antwort auf die Frage nach dem fehlenden Balun.

Bekanntlich kann ein Balun direkt am Fußpunkt der Antenne, am Eingang der Speiseleitung oder direkt hinter dem Sender angeordnet werden. Alle drei Möglichkeiten werden nach wie vor von Funkamateuren favorisiert. Die resonante Antenne hat per Definition einen nahezu reellen Antennen-

widerstand, bestehend aus Strahlungs- und Verlustwiderstand. Außerhalb der Resonanz ist der Blindanteil entweder induktiv oder kapazitiv so dass immer ein Anpassnetzwerk verwendet werden muss. Egal ob Resonanz, induktiv oder kapazitiv, die wichtigste Frage ist: „Welche Leistung wird von meiner Antenne abgestrahlt, wenn eine bestimmte Leistung seitens des Senders zur Verfügung steht?“

Der Balun ist ein Element einer Antennenanlage und hier stellt sich die Frage: „Wo sollte der verlustbehaftete Balun angeordnet werden um möglichst viel der teuer erzeugten Leistung an die Antenne zu bringen?“

In dem Beitrag „Wohin mit dem verlustbehafteten Balun“ wurde die Frage beantwortet ob der Balun direkt am Senderausgang oder hinter dem Anpassnetzwerk angeordnet werden sollte. Mit wenigen Ausnahmen ist der Balun hinter dem Anpassnetzwerk, also zwischen Anpassnetzwerk und Eingang der Speiseleitung anzuordnen, will man große Leistungsverluste meiden. Das hat den weiteren Vorteil, dass das Anpassnetzwerk unsymmetrisch gegen Masse aufgebaut werden kann und den Nachteil, dass eine Zweidrahtleitung verwendet werden muss. Bleibt die offene Frage, verlustbehafteter Balun direkt am Antennenspeisepunkt oder am Eingang der Speiseleitung? Dabei haben wir noch die Auswahl zwischen einem 1:1 oder 1:4 Balun.

## 1. Der resonante $\lambda/2$ -Dipol mit einem Balun direkt an der Antenne

Wird eine resonante  $\lambda/2$  Antenne oberhalb oder unterhalb der natürlichen Resonanzfrequenz betrieben, ist die Eingangsimpedanz entweder kapazitiv oder induktiv mit einem nieder ohmigen Realteil. Was ändert sich alles bei Änderung der Frequenz? Wir berechnen einen resonanten 80 m Dipol über realem Grund mit einer Höhe  $H = 10$  m.

Frequenz MHz	Impedanz $\Omega$	Gewinn dBi	Strahlungswinkel Grad	Polarisation	Bemerkung
3.5	$29 - j 53$	8.10	90	H	unterhalb kapazitiv
3.6	$33 + j 0$	8.14	90	H	Resonanz
3.7	$37 + j 50$	8.18	90	H	oberhalb induktiv
3.8	$42 + j 102$	8.21	90	H	oberhalb induktiv

**Tab. 1.1** Impedanzen eines ( $\lambda/2$ ), 80 m-Band-Dipols über realem Grund und der Höhe  $H = 10$  m, Drahtdurchmesser ist  $d = 1.6$  mm, Skin-Effekt berücksichtigt.

## 1.1 Der Dipol verschiedener Länge im 80 m Band

Zum Vergleich zu Tab. 1.1 berechnen wir einen Dipol bei fester Frequenz  $f = 3.6$  MHz und verändern die Länge der Antenne (Randbedingungen wie unter Tab. 1.1).

Länge Antenne	Impedanz $\Omega$	Gewinn dBi	Strahlungswinkel Grad	Polarisation	Bemerkung
2 x 10 m	$6.9 - j 1058$	6.98	90	H	
2 x 15 m	$15.8 - j 462$	7.65	90	H	
2 x 20 m	$33 + j 0$	8.14	90	H	<b>Resonanz</b>
<b>2 x 27 m</b>	<b><math>99 + j 749</math></b>	<b>8.74</b>	90	H	
2 x 30 m	$180 + j 1262$	8.99	89	H	
2 x 40 m	$9445 - j 8423$	9.93	87	H	

**Tab. 1.2** Impedanzen eines Dipols verschiedener Längen in 10 m Höhe über realem Grund mit Verlusten, Kupferdraht  $D = 2$  mm

## 2. Der resonante $\lambda/2$ -Dipol mit Balun direkt an der Antenne

Für die Berechnung der Gesamtverluste müssen wir immer das gesamte System, Zuleitung, Anpassnetzwerk und Balun betrachten. Je nach Reihenfolge stellen sich unterschiedliche Verluste des Gesamtsystems ein. Wird der Balun (Balanced to Unbalanced) direkt an der Antenne betrieben ist die Speiseleitung folglich ein Koaxkabel, das in diversen Ausführungen und Dämpfungswerten zur Auswahl steht.

Wir berechnen mit den Impedanzen nach Tab. 1.1 die Eingangsimpedanzen eines 1:1 und 1:4 Balun üblicher Ausführung mit einer primären Induktivität  $L_1 = 10 \mu\text{H}$ , einer Spulengüte von  $Q_L = 50$  und einem Koppelfaktor  $k = 0.9$

Frequenz MHz	3,5 MHz	Verlust Balun dB	3,6 MHz	Verlust Balun dB	3,7 MHz	Verlust Balun dB	3,8 MHz	Verlust Balun dB
Eingangsimpedanz Balun 1:1	$49 + j 6$	1,02	$34 + j 47$	1,18	$27 + j 80$	1,33	$23 + j 105$	1,48
Eingangsimpedanz Balun 1:4	$15 + j 31$	3,56	$15 + j 44$	3,48	$15 + j 54$	3,41	$15 + j 65$	3,31

**Tab. 2.1** Eingangsimpedanz und Verlust eines Balun am Fußpunkt der Antenne im 80 m Band

**Bemerkung:** Optimiert man den Balun auf geringste Verluste, dann ist für den 1:1 Balun eine Induktivität von  $L_1 = 3.5 \mu\text{H}$  zu wählen mit einem minimalen Verlust von  $L = 1,12$  dB, für einen 1:4 Balun ergibt sich eine Induktivität von  $L_1 = 0,9 \mu\text{H}$  bei einem Verlust der Balun von ebenfalls  $L = 1,12$  dB. ( $k = 0.9$ )

Nun berechnen wir die Gesamtverluste der Antennenanlage, bestehend aus Balun direkt an der Antenne, dem dämpfungsarmen Koaxkabel RG-213 der Länge  $L = 20$  m und die Verluste eines LC-Anpassnetzwerks mit Transformation auf  $50 \Omega$  als Impedanz des Senders. Die Güte der Spule in der Anpassschaltung sei  $Q_L = 50$  und die Güte der Kapazität  $Q_c = 500$ . Die Spulen im Balun sollen eine Güte von  $Q = 50$  haben.

Balun	Frequenz MHz	Verlust Balun nach Tab.2.1	RG 213 Kabel – $50 \Omega$ 20 m dB	Verlust LC-APN dB	Gesamtverluste der Antennenanlage mit Kabel dB	Bemerkung
1:1	3.5	1,02	0,231	0,04	<b>1,29</b>	
1:1	3.6	1,18	0,340	0,13	<b>1,65</b>	Resonanz
1:1	3.7	1,33	0,748	0,08	<b>2,16</b>	

<b>1:1</b>	<b>3.8</b>	148	1,309	0,10	<b>2,89</b>	
1:4	3.5	3,56	0,390	0,27	<b>4,22</b>	
1:4	3.6	3,48	0,410	0,26	<b>4,15</b>	Resonanz
1:4	3.7	3,41	0,703	0.19	<b>4,31</b>	
1:4	3.8	3,31	0,927	0.11	<b>4,35</b>	

**Tab. 2.2** Gesamtverluste: Balun + Verluste Kabel RG 213 + Verluste LC-Anpassnetzwerk ( $Q_L = 50$  und  $Q_c = 500$ ), Balun direkt an der Antenne, Speisung mit dämpfungsarmen Koaxkabel RG 213. Gesamtverlust: Summe Tab. 2 + Tab.3, Spalte 6

**Im Vergleich** zu Tab. 2.2 berechnen wir die Verluste der Antennenanlage für einen im 80-Band optimierten 1:1 bzw. 1:4 Balun. Die Induktivität des 1:1 Balun ist  $L = 3,5 \mu\text{H}$ , die Induktivität des 1:4 Balun  $L = 0,9 \mu\text{H}$

Balun	Frequenz MHz	Verluste Balun an der Antenne dB	Verluste RG 213 Kabel + APN dB	Gesamtverluste der Antennenanlage mit Kabel dB	Bemerkung
<b>1:1</b>	3.5	0,29	0,34	<b>0,37</b>	Balun optimiert
<b>1:1</b>	3.6	0,54	0,48	<b>1,02</b>	Balun optimiert
<b>1:1</b>	3.7	0,78	0,67	<b>1,45</b>	Balun optimiert
<b>1:1</b>	3.8	1,12	1,40	<b>2,52</b>	Balun optimiert
1:4	3.5	0,30	0,35	<b>0,65</b>	Balun optimiert
1:4	3.6	0,50	1,12	<b>1,62</b>	Balun optimiert
1:4	3.7	0,79	1.95	<b>2,74</b>	Balun optimiert
1:4	3.8	1,12	2,67	<b>3,79</b>	Balun optimiert

**Tab. 2.3** Gesamtverlust der Antennenanlage für die im 80 m Band optimierten Balune

Wir vergleichen die Werte der Tab. 2.2 mit den Werten der optimierten Balune nach Tab. 2.3. Ein enormer Unterschied in den Verlusten. Es lohnt sich also die auf die Induktivität optimierten Balune einzusetzen. (Siehe Rechenbeispiel am Ende des Beitrags)

### 3. Der $\lambda/2$ -Dipol mit Balun am Eingang der Hühnerleiter

Der bei der Frequenz  $f = 3.6 \text{ MHz}$  resonante Dipol wird mit einer Hühnerleiter  $L = 20 \text{ m}$ ,  $600 \Omega$  eingespeist. Wir berechnen die Gesamtverluste, die sich aus den Einzelverlusten in der Reihenfolge, Hühnerleiter, Balun und Anpassnetzwerk zusammensetzen.

Balun Art	Frequenz MHz	Verluste HL $600 \Omega$ $L = 20 \text{ m}$	Verluste Balun dB $L_1 = 10 \mu\text{H}$	Verluste LC-APN dB	Gesamtverluste der Antennenanlage mit HL dB	Gesamtverluste der Antennenanlage mit Kabel dB, Tab.2.2
<b>1:1</b>	<b>3.5</b>	0,213	3,79	1,26	<b>5,21</b>	<b>1,29</b>
<b>1:1</b>	<b>3.6</b>	0,180	3,42	1,23	<b>4,83</b>	<b>1,65</b>
<b>1:1</b>	<b>3.7</b>	0,171	2,94	3,41	<b>6,52</b>	<b>2,16</b>
<b>1:1</b>	<b>3.8</b>	0,096	2,06	1,16	<b>3,32</b>	<b>2,89</b>
1:4	3.5	0,213	1,47	0,88	<b>2,56</b>	<b>4,22</b>
1:4	3.6	0,180	1,44	0.90	<b>2,52</b>	<b>4,15</b>
1:4	3.7	0,171	0,64	0,46	<b>1,27</b>	<b>4,31</b>
1:4	3.8	0,096	0,40	0,45	<b>0,95</b>	<b>4,35</b>

**Tab. 3.1** Gesamtverluste der Antennenanlage mit Balun 1:1 bzw. 1:4 am Ausgang des unsymmetrischen LC-Anpassnetzwerks

Aus Tab. 3.1 ist ersichtlich, dass in diesem Fall der 1:4 Balun direkt am Eingang der Hühnerleiter die geringeren Verluste zeigt. Nicht immer führt ein 1:1 Balun am Hühnerleiter Eingang zu niedrigen Gesamtverlusten der Anlage. Daher sollte eine Antennenanlage immer berechnet werden um von Fall zu Fall entscheiden. Die hohen Dämpfungswerte werden hervorgerufen durch die ungünstige Länge der Hühnerleiter, etwa  $\lambda/4$ . Das führt zu hohen Impedanzen am Eingang der Hühnerleiter durch die  $\lambda/4$  Transformation. Es gibt daher auch eine optimale Länge der Zweidrahtleitung, die durch Berechnung und Optimierung ermittelt werden kann.

#### 4. Der Dipol verschiedener Längen mit diversen Zuleitungen und deren Verluste

Länge Antenne	RG 213 Kabel 50 $\Omega$ dB	300 $\Omega$ Leitung dB	450 $\Omega$ Leitung dB	600 $\Omega$ Leitung dB	Bemerkung
2 x 10 m	20.87	11.78	6.95	6.35	
2 x 15 m	10.60	4.64	2.82	2.97	
2 x 20 m	0.65	1.05	1.21	1.55	Resonanz
2 x 27 m	7.09	1.14	1.41	<b>0.74</b>	minimaler Verlust ohne Balun
2 x 30 m	8.75	1.50	0.95	1.07	
2 x 40 m	11.28	3.22	0.77	0.49	

**Tab. 4.1** Gesamtverluste einer Antennenanlage, Dipole verschiedener Längen plus Zuleitungen mit üblichen Wellenwiderständen bei der festen Frequenz  $f = 3.6$  MHz - ohne Balun

##### 4.1 Gesamtverluste eines Dipols der Länge 2 x 27 m. Balun am Eingang der 600 $\Omega$ Zweidrahtleitung, Zuleitungslänge $L = 20$ m, etwa $\lambda/4$ , Frequenz $f = 3.6$ MHz.

Frequenz MHz	Impedanz 3,6 MHz $\Omega$	Verlust Balun dB	Eingangs-impedanz Zweidrahtleitung 20 m, 600 $\Omega$	Verlust der Zweidrahtleitung $L = 20$ m dB
3,6 MHz	Antenne $99 + j749$		$56,7 - j 406$	0,070
<b>Balun 1:1 Primärimpedanz</b>	$74 + j 432$	0,61	Verluste LC-Netzwerk 0,73 dB	Gesamtverluste Antennenanlage $0,07 + 0,61 + 0,73 = \mathbf{1,41 \text{ dB}}$
<b>Balun 1:4 Primärimpedanz</b>	$53 - j 99$	1,59	Verluste LC-Netzwerk 0,17 dB	Gesamtverluste Antennenanlage $0,07 + 1,59 + 0,17 = \mathbf{1,83 \text{ dB}}$

**Tab. 4.2** Gesamtverluste einer Antennenanlage mit einem Dipol 2 x 27 m, bei der festen Frequenz  $f = 3.6$  MHz mit wahlweise 1:1 oder 1:4 Balun zwischen Anpassnetzwerk und Hühnerleiter.

Tab.4.2 zeigt, dass der 1:1 Balun die geringeren Verluste hat. Der Balun hat in diesem Beispiel folgende Daten  $L_1 = 10 \mu\text{H}$ ,  $k = 0,9$ , Güte der Spulen  $Q_L = 50$ .

**Beispiel: 4.1**

Nach Tab 4.2 hat eine Antennenanlage mit einem  $2 \times 27$  m Dipol, einer 20 m Hühnerleiter  $600 \Omega$  und einem 1:1 Balun zwischen Zweidrahtleitung und Anpassnetzwerk eine Dämpfung von  $D = 1.41$  dB. Der Sender habe eine verfügbare Leistung von  $P_v = 500$  W. Welche Leistung steht am Fußpunkt der Antenne an? Mit  $D = 1.41$  dB berechnet sich der lineare Faktor zu  $a = 10^{0,141} = 1.3835$ . Damit ist die Leistung an der Antenne  $P_{\text{ant}} = 500 \text{ W} / 1.3835 = 361,38$  W. Der Antennenwirkungsgrad vermindert diese Leistung, der Antennengewinn vergrößert diese. Nach Tab. 1.2 ist der Antennengewinn  $G = 8.74$  dB. Rechnen wir mit einem Antennenwirkungsgrad von  $\eta = 90 \%$ , so ergibt sich eine Strahlungsleistung  $\text{EIRP} = 2433$  W und in 10 m Abstand – also im **Nahbereich** - eine elektrische Feldstärke von  $E_{\text{eff}} = 43,28$  (V/m) /9/ - also nicht wenig.

**5. Bestimmung der hochfrequenten Eigenschaften eines Balun aus Messungen**

Heute sind Amateure oftmals mit Messgeräten ausgestattet von denen wir damals nicht mal träumen konnten. Mit ihnen kann die Impedanz nach Real- und Imaginärteil direkt bestimmt werden. Hat man einen Balun gewickelt, dann interessieren die Daten wie Induktivität, Verlustwiderstand und Kopplung usw. Vorerst muss das Messgerät geeicht werden. Dazu wird ein Kurzschluss an den Messklemmen produziert. Der Messwert muss sein  $R = 0$ ,  $X = 0$ . Jetzt misst man mit einem bekannten Abschluss z.B.  $50 \Omega$ . Die Anzeige sollte  $R = 50$  und  $X = 0$  sein.

1. Um sicher zu gehen misst man mit einem Ohmmeter, wahlweise mit einer Batterie und einem Voltmeter ob eine galvanische Trennung zwischen primärer und sekundärer Wicklung vorliegt. Es darf kein Feinschluss bemerkbar sein.
2. Dann misst man bei verschiedenen Frequenzen in die Primärseite des Balun, bei offenem Sekundärkreis. Die Messung ergibt den primären Verlustwiderstand  $r$  und die primäre Induktivität. Hat man einen 1:1 Balun gewickelt weiß man, dass die sekundäre Induktivität den gleichen Wert hat. Bei einem 1:4 Übertrager ist die sekundäre Induktivität  $4 \times L_1$ , ebenso der sekundäre Verlustwiderstand.
3. Jetzt misst man bei den gleichen Frequenzen in den Eingang des Balun bei kurzgeschlossener Sekundärwicklung. Dieser Messwert besteht aus Real – und Imaginärteil. Der Realteil besteht aus dem Verlustwiderstand  $r_1$  vergrößert um den transformierten Verlustwiderstand  $r_2$ . Der Imaginärteil zur Messung 2. muss sich verkleinert haben und zwar um den transformierten Blindanteil der Sekundärwicklung. (siehe Formel und Beispiel im Anhang.)
4. Zur Kontrolle messen wir den Balun mit einem definierten Abschlusswiderstand z.B.  $50 \Omega$ . Der Realteil des Messwertes ist jetzt der primäre Verlustwiderstand  $r_1$  vergrößert um den transformierten Realteil der Abschlussimpedanz, also  $(r_2 + 50\Omega)$ .

Aus diesen Messwerten 2. und 3. können wir die Eigenschaften des Balun leicht bestimmen.

**Anhang: Zunächst als Wiederholung einiges zur Theorie des Übertragers****Der Übertrager mit Verlusten**

Beim **verlustbehafteten** Übertrager ist die Eingangsimpedanz

$$Z_{\text{in}} = (r_1 + j\omega L_1) + (\omega M)^2 / (R_2 + r_2 + j\omega L_2) \quad (\text{Gl.1})$$

Bei  $\omega M = 0$ , d.h. offenem Sekundärkreis, ist die Eingangsimpedanz

$$Z_{\text{in}} = (r_1 + j\omega L_1) \quad (\text{Gl.2})$$

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

Die Verlustwiderstände  $r_{1,2}$  sind der Güte der Spulen zugeordnet. Je größer die Güte umso kleiner die Verlustwiderstände. Der Verlustwiderstand berechnet sich aus der Güte der Spulen zu  $r = \omega L/Q$ .

Wir teilen (Gl.1)  $Z = R \pm jX$  nach Real- und Imaginärteil auf. Der Realteil ist

$$R = r_1 + (\omega M)^2 * (R_2 + r_2) / [(R_2 + r_2)^2 + (\omega L_2)^2] \quad (\text{Gl.3})$$

und der Imaginärteil

$$X = j\omega L_1 - (\omega M)^2 * \omega L_2 [(R_2 + r_2)^2 + (\omega L_2)^2] \quad (\text{Gl.4})$$

Für Kurzschluss am Ausgang ist  $R_2 = 0$  zu setzen.

Der Koppelfaktor ist  $k = M / \sqrt{L_1 * L_2}$  und bei einem 1:1 Balun ( $L_1 = L_2$ )

$$k = M / L_1 \quad (\text{Gl.5})$$

### Beispiel:

#### Messungen an einem unbekanntem 1:1 Balun

Wir messen mit einem miniVNA:

##### 1. Balun sekundär offen:

3.6	MHz	R = 0,91	X = 79,2
7.2	MHz	R = 1,85	X = 156,4
10.8	MHz	R = 2,7	X = 240,6

Die drei Frequenz stehen im Verhältnis 1:2:3, d.h. die Verlustwiderstände und der Blindanteil müssen sich ungefähr in diesem Verhältnis verhalten. Dabei sind die Toleranzen des Messgerätes zu berücksichtigen und die Widerstände sind keine Konstanten sondern frequenzabhängig, was wir außer Acht lassen wollen. Aus obigen Messwerten mit wird mit (Gl.2) und  $X = 2\pi f L_1$

$$r_1 = 0,9 \Omega \text{ und } L_1 = 3,5 \mu\text{H.}$$

Bei einem 1:1 Balun haben wir damit auch die Werte der Sekundärseite  $r_2 = 0,9 \Omega$  und  $L_2 = 3,5 \mu\text{H.}$

##### 2. Balun sekundär kurz geschlossen:

3.6	MHz	R = 0,3	X <sub>s</sub> = 10,1
7.2	MHz	R = 0,7	X <sub>s</sub> = 19,8
10.8	MHz	R = 1	X <sub>s</sub> = 29,9

Zunächst sehen wir gegenüber der Messung 1, dass sich der Imaginärteil verringert hat, was auch richtig ist. Aus (Gl.4) mit  $R_2 = 0$  berechnen wir leicht  $\omega M = 74 \Omega$  und daraus die Gegeninduktivität bei  $f = 3,6$  MHz zu  $M = 3,27 \mu\text{H.}$

Der Koppelfaktor nach (Gl.5)

$$k = \omega M / \omega L_1 = 74 / 79,2 = 0,934$$

3. Balun, sekundär mit  $50 \Omega$  Dummy Load abgeschlossen. Diese Messung mit einem  $50 \Omega$  Dummy Load gilt eigentlich nur als Kontrolle der

Messwerte aus 1. und 2.

3.6	MHz	R = 39,9	X = 31
7.2	MHz	R = 39,1	X = 35,2
10.8	MHz	R = 42,8	X = 42,6

Zunächst sehen wir gegenüber der Messung 1, dass sich auch hier der Imaginärteil verringert hat, was auch richtig ist. Mit den ermittelten Daten des 1:1 Balun berechnen wir zur Kontrolle die Eingangsimpedanz nach Real- und Imaginärteil bei der Frequenz  $f = 7,2$  MHz.

Nach (Gl.3) ergibt sich mit den ermittelten Messwerten für  $f = 7,2$  MHz - doppelte Frequenz von 3.6 MHz der gegeninduktive Widerstand

$$X_m = 74 * 2 \Omega = 148 \Omega$$

und der Blindwiderstand  $X_{L1} = 79,2 * 2 = 158,4 \Omega$ . Wir berechnen mit  $R_2 = 50 \Omega$  den Realteil zu

$$R = 41,14 \Omega$$

und den Imaginärteil

$$X = 38,14 \Omega.$$

und vergleichen mit den Messwerten nach 3. Die Messwerte stimmen einigermaßen übereinstimmen.

Wir bestimmen noch die Güte der Spulen bei  $f = 3,6$  MHz zu  $Q = 79,2 \Omega / 0,9 = 88$  - ein guter Wert.

Auf die gleiche Weise können wir auch einen 1:4 Balun ausmessen und aus den Messwerten alle wichtigen Daten des Balun berechnen.

#### Was können wir noch mit den Messwerten alles anfangen?

##### Beispiel 1

Die Verlustwiderstände bei der Frequenz  $f = 3,6$  MHz sind  $r_1 = r_2 = 0,9 \Omega$ . Die Eingangsimpedanz berechnet sich zu  $Z_{in} = (32,31 + j 30,30) \Omega$ .

Wird der Übertrager an einer Quelle mit dem Innenwiderstand  $R_i = 50 \Omega$  betrieben, berechnet sich der eingangsseitige Reflexionsfaktor zu  $r = [(50 - (32,31 + j 30,30))] / (50 + 32,31 + j 30,30)$  und daraus das Quadrat  $r_1^2 = 0,15999$ .

Bei einer verfügbaren Leistung der Quelle von  $P_v = 100$  Watt gehen in den Übertrager (gerundet)  $P_{in} = P_v (1 - r^2) = 100 \text{ W} * 0,84 = 84 \text{ W}$ .

Die Leerlaufspannung der Quelle berechnet sich aus  $P_v = U_o^2 / 4 R_i$  zu  $U_o = \sqrt{P_v * 4 R_i} = \sqrt{400 \text{ W} * 50 \Omega} = 141,42 \text{ V}_{eff}$  und daraus der Betrag des Eingangsstromes  $I_1 = 141,42 \text{ V} / |(50 \Omega + 41,17 + j 33,06)| = 1,6122 \text{ A}_{eff}$ .

Der Verlust im Primärkreis des Übertragers daher  $P_{vr1} = 2,599 \text{ A}^2 * 0,9 \Omega = 2,339 \text{ W}$ .

Mit dem Verlustwiderstand  $r_2 = 0,9 \Omega$  finden wir die das Quadrat der Stromübersetzung

$$\left| I_2 / I_1 \right|^2 = \left| (\omega M) / (R_2 + r_2 + j \omega L_1) \right|^2 = 1,272$$

Die Verlustleistung im Sekundärkreis  $P_{vr2} = 1,604 \text{ A}^2 * 0,9 \Omega = 1,433 \text{ W}$  und der Gesamtverlust  $P_{vges} = 3,79 \text{ W}$ . Mit  $I_2 = 1,266 \text{ A}$  berechnet sich die Leistung am Lastwiderstand  $R_2 = 50 \Omega$  zu  $P_2 = (1,266 \text{ A})^2 * 50 \Omega = 80,21 \text{ W}$ . Der Verlust im Balun ist  $\Delta P = 84 \text{ W} - 80,21 \text{ W} = 3,79 \text{ W}$ . Das Ergebnis stimmt auffallend mit den oben errechneten Werten überein. Wir haben also richtig gerechnet. Von der verfügbaren Leistung der Quelle  $P_v = 100 \text{ W}$  erreicht die Last am Ausgang des Übertragers eine Leistung von  $P_2 = 80,21 \text{ W}$ , der Transfer-Wirkungsgrad daher  $\eta_T = 80,21 \%$ .

Die Übertragungsleistungsverstärkung ist das Verhältnis von der an die Last abgegebenen Wirkleistung zur verfügbaren Leistung der Quelle.  $L_{üdB} = -10 \log(80,21 / 100) = -10 \log(0,8021) = -0,957 \text{ dB}$ , d.h. der Balun hat eine Dämpfung von  $D_{ü} = 0,957 \text{ dB}$ , rund  $0,96 \text{ dB}$ , bei einer ohmschen Belastung von  $R_2 = 50 \Omega$ .

Der Verlust des Balun, als Verhältnis der tatsächlich zugeführten Leistung zur Leistung an der Last ist  $L_{eff} = -10 \log(84 / 80,21) = -0,2 \text{ dB}$ . Dieser Wert ist wichtig bei der Berechnung der Gesamtverluste einer abgestimmten Antennenanlage.

Der höhere Wert der Dämpfung  $D_{ü}$  wird hervorgerufen durch die Fehlanpassung am Eingang des Balun.

Hat man die Messwerte ermittelt können die gesamten Verluste, auch für den Fall komplexer Lasten, berechnet werden.

### Beispiel 2

Wir berechnen in der gleichen Weise die Werte des 1:1 Balun für die Frequenz  $f = 7,2 \text{ MHz}$  und einer Belastung mit  $50 \Omega$ . Die interessierenden hochfrequenten Werte: Eingangsimpedanz  $Z = (42,7 + j 33) \Omega$  (ziemlich genau die Werte des Messung),  $D_{ü} = 0,91 \text{ dB}$  und  $D_{eff} = 0,35 \text{ dB}$ .

### Beispiel 3

Wir berechnen in der gleichen Weise die Werte des 1:1 Balun für die Frequenz  $f = 10,8 \text{ MHz}$  und einer Belastung mit  $50 \Omega$ . Die interessierenden hochfrequenten Werte: Eingangsimpedanz  $Z = (50 + j 40) \Omega$  (ziemlich genau die Werte des Messung),  $D_{ü} = 1,49 \text{ dB}$  und  $D_{eff} = 0,83 \text{ dB}$ .

Nachdem wir durch die Beispiele 1- 3 die Richtigkeit der Messungen durch Vergleich überprüft haben, können wir mit den Messdaten des Balun, für alle interessierenden Frequenzen im KW-Bereich, die wichtigsten hochfrequenten Eigenschaften berechnen.

Frequenz MHz	Eingangsimpedanz $\Omega$	Dämpfung $D_{eff}$ dB
1,9	18 + j 27	0,15
3,6	32 + j 30	0,20
7,1	42 + j 33	0,34
14,15	49 + j 48	0,62
21,20	53 + j 65	0,90
29,50	57 + j 87	1,20

Wir können, bei gleicher Güte, eine Optimierung des Balun vornehmen und erreichen mit  $L_{opt} = 0,8 \mu\text{H}$  folgende Werte

Frequenz MHz	Eingangsimpedanz $\Omega$	Dämpfung $D_{eff}$ dB
1,9	1,64 + j 9,2	0,31
3,6	5,24 + j 16,3	0,19
7,1	15,09 + j 25,3	0,15
14,15	30,16 + j 30,4	0,19
21,20	37,50 + j 31,1	0,25
29,50	41,89 + j 32,9	0,32

Zuletzt soll noch die technische Ausführung beleuchtet werden.

a. Eine Luftspule  $L = 1 \mu\text{H}$  hat einen Durchmesser  $D = 40 \text{ mm}$  und eine Länge von  $l = 60 \text{ mm}$  bei 7 Windungen, bifilar gewickelt.

b. Eine Luftspule  $L = 10 \mu\text{H}$  kann mit  $D = 60 \text{ mm}$  und einer Länge  $l = 80 \text{ mm}$  bei 17 Windungen erreicht werden. Bifilare Wicklung

c. Sollte einem Ringkern der Vorzug gegeben werden gilt mit den bekannten Nachteilen der Sättigung:  $L = 1 \mu\text{H}$ , Ringkern T 106 - 2, Farbe rot, 9 Windungen, max. Drahtdurchmesser  $d = 3,69 \text{ mm}$ . Der Kern hat einen Außendurchmesser  $D_a = 26,9 \text{ mm}$ , einen Innendurchmesser  $D_i = 14,5 \text{ mm}$  und eine Kernhöhe  $h = 11,1 \text{ mm}$ . Der Verlust im Kern ist bei  $f = 3,6 \text{ MHz}$ ,  $P_v = 143 \text{ mW/cm}^3$  entsprechend  $P = 0,64 \text{ W}$ . Der maximal zulässige Flux  $\Phi = 7,93 \text{ mT}$ , bei einer Spannung von  $50 \text{ V}$  ist der Flux  $\Phi = 5,03 \text{ mT}$  mit einer Temperaturerhöhung  $\Delta C = 12^\circ\text{C}$ .

**Fazit:**

Eine Antenne kann, braucht aber nicht in Resonanz betrieben werden. Es ist sinnvoll diese länger als die erste Resonanzwellenlänge zu wählen. Für das 80 m Band führt eine Länge von 2 x 27 m zu geringen Gesamtverlusten der Antennenanlage und ist auch für andere Bänder gut geeignet.

Ist eine Speisung der Antenne nur mit einer koaxialen Zuleitung möglich, kann die Antenne nur in einer der Serienresonanzen betrieben werden. Der niederohmige Fußpunktwiderstand führt zu einem kleinen VSWR und damit zu geringen Verlusten auf der Zuleitung. Bei einem kleinen VSWR ist auch die Abschlussimpedanz für die Anpassschaltung in der Nähe von 50  $\Omega$  und hat geringe Verluste. Mehrbandbetrieb einer unbeschwertten Antenne mit Koaxspeisung verbietet sich von selbst.

Antennen, die länger als die erste Resonanzwellenlänge ist, können nur mit einer symmetrischen Zuleitung – möglichst 450 oder 600  $\Omega$  betrieben werden. Die auftretenden Verluste sind dann tragbar. Eine 600  $\Omega$  Leitung hat gegenüber der 450  $\Omega$  Leitung den Vorteil der größeren Spannungsfestigkeit von ca. 12000 V verbunden mit der höheren Leistungsübertragung, die allerdings durch das Stehwellenverhältnis wieder reduziert wird /1, 9/.

Abschließend soll noch erwähnt werden, dass 1dB einem Verlust von 20 % bedeutet, 3 dB einen Verlust von 50% und 4 dB einen Verlust von rund 60 %.

DL3LH, Walter  
[wa-schau@t-online.de](mailto:wa-schau@t-online.de)  
[dl3lh@gmx.de](mailto:dl3lh@gmx.de)

**Literatur:**

- /1/ The ARRL Antenna Book
- /2/ Kurze Antennen, Gerd Janzen, Frankh'sche Verlagshandlung, Stuttgart
- /3/ Passive Netzwerke zur Anpassung in hochfrequenten Schaltungen, W. Schau, DL3LH,
- /4/ Pi-Filter mit Verlusten Dr. Schau, DL3LH,
- /5/ Die Antenne macht die Musik, Dr. Schau, DL3LH
- /6/ Die T-Anpassung, W. Schau, DL3LH
- /7/ Antennenmesstechnik I - IV, W. Schau, DL3LH,
- /8/ Endkapazitäten für verkürzte Dipole, DK5XX,
- /9/ Die Antenne macht die Musik, W. Schau, DL3LH,
- /10/ Langdrahtantennen für den KW-Bereich, W. Schau, 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.