

# **Transformatoren bei Hochfrequenz**

## **Der Phasen-Umkehr- Transformator**

### **Teil 3**

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

## 1. Der PUT direkt am Senderausgang ohne Verluste

Manchmal wird der PUT direkt hinter einem Transceiver, also an 50 Ω Seite betrieben. Die zwischen PUT und Antennenzuleitung liegende Anpassschaltung wird meist auch noch aus Unkenntnis in der HF-Technik symmetrisch, mit doppelten Bauteileaufwand, ausgeführt. Das hat den weiteren Nachteil, dass alle Bauteile hochfrequenztechnisch „hoch“ liegen.

Wir berechnen die Ausgangsimpedanz, wenn der PUT direkt an 50 Ω betrieben wird. Dazu schließen wir den PUT eingangsseitig mit einem realen Widerstand von  $R_o = 50 \Omega$  ab und berechnen die ausgangsseitigen Impedanzen.

Nach Teil 1 Abschnitt 5, (Gl.26) berechnete sich diese Ausgangsimpedanz bei reellem Abschluss des PUT am Eingang zu

$$\underline{Z}_2 = \omega^2 (L_1 + M)^2 / (R_o + j \omega L_1) + j \omega L. \quad (\text{Gl.1.1})$$

mit  $j\omega L = 2j\omega L_1 + 2j\omega M$ .

und das Verhältnis nach (Gl.22) der Ströme zu

$$\underline{I}_1 = - \underline{I}_2 j (\omega L_1 + \omega M) / (R_o + j\omega L_1) \quad (\text{Gl.1.2})$$



**Bild 1.1:** Luft PUT bei DJ9LI, Rudolf Wattenscheid an seinem KSG 1300

bei Einspeisung genau in der Mitte ist der Koppelfaktor folglich

$$k^2 = (L_1 + M) / [(L_1 * (2L_1 + 2M))] \quad (\text{Gl.1.3})$$

### Beispiel 1.1

Wir berechnen die Ausgangsimpedanz eines PUT wenn dieser direkt am Senderausgang betrieben wird. Mit der Induktivität  $L_1 = L_2 = 5 \mu\text{H}$  und einer Gegeninduktivität  $M = 5\mu\text{H}$  berechnet sich die

Gesamtinduktivität zu  $L_{\text{ges}} = 20 \mu\text{H}$ . Der Koppelfaktor nach (Gl.1.3) berechnet sich zu  $k=1$ .

Bei  $f = 3,6 \text{ MHz}$  hat die primäre und sekundäre Induktivität einen Blindwiderstand  $X_L = 113,097 \Omega$  und die Gegeninduktivität zufällig auch  $X_M = 113,097 \Omega$ , die Gesamtinduktivität  $L_{\text{ges}}$  einen Blindwiderstand  $X_L = 452,39 \Omega$ .

Nach (Gl.1.1) berechnet sich die Ausgangsimpedanz  $\underline{Z}_2 = (226.19 \Omega)^2 / (50 + j 113) \Omega + j 452.39 \Omega = (167,30 + j 73,96) \Omega$ . Diese Impedanz ist bei  $f = 3,6 \text{ MHz}$  die Quellimpedanz für das nachgeschaltete Anpassnetzwerk. Selbstverständlich ist diese Ausgangsimpedanz frequenzabhängig, d.h. die Anpassschaltung „sieht“ je nach Frequenz immer eine andere Impedanz.

Angenommen es liegt bei der Frequenz  $f = 3,6 \text{ MHz}$  eine induktive Last von  $\underline{Z} = (300 + j 300) \Omega$  vor, hat das Anpassnetzwerk jetzt die Aufgabe diese beiden Impedanzen aufeinander anzupassen, d.h. die Eingangsimpedanz der Anpassschaltung muss  $\underline{Z}_{\text{in}} = (167,30 - j 73,96) \Omega$  und die Ausgangsimpedanz  $\underline{Z}_{\text{out}} = (300 - j 300)$  betragen. Man spricht von einem Impedanzpuffer.

Wir berechnen für den verlustlosen Fall noch die Ausgangsimpedanzen für die üblichen Amateurbänder, bevor wir uns mit den Verlusten des PUT beschäftigen.

Frequenz MHz	Ausgangs- impedanz PUT Ω k = 1	Ausgangs- impedanz PUT Ω k = 0,95
1,9	117,53 + j 98,45	111,73 + j 99,41
3,6	167,30 + j 73,96	159,04 + j 81,34
7,15	190,56 + j 42,42	181,15 + j 62,22
14,15	197,50 + j 21,22	187,75 + j 64,46
21,2	198,88 + j 14,93	189,06 + j 79,13
29,5	199,42 + j 10,76	189,57 + j 100,59

**Tab.1.1** Ausgangsimpedanzen des PUT ohne Verluste, direkt am Senderausgang mit  $R_o = 50 \Omega$ ,  $L_1 = L_2 = 5\mu\text{H}$

Die Induktivität von  $5 \mu\text{H}$  ist eine Annahme. Eine Aussage über einen optimalen Wert kann erst getroffen werden wenn die Verluste mit einbezogen werden.

Durch die besondere Beschaltung des PUT sollte dieser eigentlich  $R_o$  mit dem Faktor 4 auf die Sekundärseite übersetzen. Das gilt allerdings nur für den idealen PUT. Wie Tab. 1.1 zeigt weichen die tatsächlichen Werte von den theoretischen weit ab. Auch hat die Ausgangsimpedanz immer einen induktiven Anteil, der bei einem realen Koppelfaktor

von  $k = 0,95$  sich mit der Frequenz vergrößert. Tab.1.1.

Die Berechnung dieses auch als 1:1 Sparübertragers bezeichneten Balun ohne Verluste ist eigentlich ein Umweg. Doch als Vergleich für die Richtigkeit der Berechnungen ist dieser kleine Umweg bedeutend.

## 2. Der PUT direkt am Senderausgang mit ohmschen Verlusten

Ziel dieses 3. Beitrags über den PUT direkt am Senderausgang ist sein Verlustverhalten, wenn der Balun direkt am Senderausgang betrieben wird, wie oft in der Amteurliteratur empfohlen. Ausgehend von den Gleichungen in Teil 1 müssen diese durch die frequenzabhängigen Verlustwiderstände der Spulen ergänzt werden. Diese Verluste berechnen sich aus der Güte der Spulen, bei kleinen Verlustwinkeln zu

$$r = \omega L / Q. \tag{Gl.2.1}$$

Mit ein wenig langweiliger Rechnung ergibt sich

$$R_{out} = 2r - [a(Ro+r) + b(\omega L_1)] / N_1 \tag{Gl.2.2}$$

$$X_{out} = 2j\omega(L_1+M) - j[ b(Ro+r) - a\omega L_1] / N_1 \tag{Gl.2.3}$$

mit den Abkürzungen

$$a = r_1^2 - (\omega L_1 + \omega M)^2 < 0 \tag{Gl.2.4}$$

$$b = 2r\omega(L_1 + M) > 0 \tag{Gl.2.5}$$

$$N_1 = [(Ro+r)^2 + (\omega L_1)^2] \tag{Gl.2.6}$$

Drehen wir die (Gl.2.2) und (Gl.2.3) durch die mathematische Mühle, ergeben sich folgende Ausgangsimpedanzen für den PUT direkt am Senderausgang.

Frequenz MHz	Ausgangs-impedanz PUT $\Omega$ , $k = 1$	Ausgangs-impedanz PUT $\Omega$ , $k = 0,95$
1,9	20,53 + j 59,82	19,54 + j 58,48
3,6	57,50 + j 89,92	54,70 + j 88,54
7,15	122,68 + j 97,96	116,67 + j 99,19
14,15	174,76 + j 71,65	166,17 + j 80,16
21,2	192,11 + j 53,28	182,66 + j 68,73
29,5	201,70 + j 40,79	191,77 + j 63,98

Tab. 2.1: Ausgangsimpedanzen  $L_{opt} = 1,4 \mu H$

Durch die besondere Beschaltung und der magnetischen Kopplung zwischen den beiden Spulen zeigt sich eine besondere Eigenart. Der Imaginärteil

wächst mit der Frequenz zunächst an um dann mit wachsender Frequenz wieder abzunehmen. Bei  $k = 0,95$  berechnet sich der Umkehrpunkt bei der Frequenz  $f = 5,8$  MHz und ein zweiter Umkehrpunkt bei  $f = 34$  MHz. Beide Umkehrpunkt kann man mathematisch durch Differenzieren und Null setzen der Ableitung der (Gl.2.2) und (Gl.2.3) berechnen.

Die Optimierung des PUT auf geringste Verluste direkt am Sender Ausgang ergibt einen Wert der Einzelinduktivität von  $L_{opt} = 1,4 \mu H$  bei einer Spulengüte von  $Q_L = 50$ .

Mit wachsender Einzelinduktivität vergrößern sich die Verluste, vor allem bei den höheren Frequenzen. Daher sollte die Einzelinduktivität den Wert  $L = 2 \mu H$  nicht übersteigen. Wohl eine wichtige Erkenntnis.

Frequenz MHz	Verluste dB $k = 1$	Verluste dB $k = 0,95$	Verluste dB $k = 0,5$
1,9	0,14	0,15	0,24
3,6	0,10	0,10	0,15
7,15	0,09	0,09	0,12
14,15	0,12	0,13	0,15
21,2	0,17	0,17	0,20
29,5	0,23	0,23	0,26

Tab.2.2: Verluste des optimierten PUT mit  $L_{opt} = 1,4 \mu H$  als Funktion des Koppelfaktors,  $R_o = 50 \Omega$ ,  $Q_L = 50$

Wie Tab.2.2 zeigt, steigt mit kleinerem Koppelfaktor der Verlust geringfügig an, d.h. auf die Kopplung muss, wie bei anderen Übertragern, kein so großes Gewicht gelegt werden.

Da wir diesen Spartransformator direkt am Senderausgang betrachten, ist es notwendig noch die Verluste der nachfolgenden LC-Anpassung in die Berechnung der Gesamtverluste einzubeziehen.

Um einen Vergleich der Verluste zu haben, berechnen wir wieder eine Antennenanlage mit Dipol  $2 \times 27$  m und einer Hühnerleiter der Länge  $l = 15$  m,  $600 \Omega$

Frequenz MHz	Impedanz Eingang Hühnerleiter Ohm	Verlust Hühnerleiter 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.2.3: Daten der Antennenanlage aus Teil 2

Frequenz MHz	Impedanz Ausgang PUT $k = 0,95$ $\Omega$	Verlust PUT dB	Verlust LC Netzwerk dB	Summe dB
1,9	19 + j 58	0,15	0,49	0,64
3,6	54 + j 88	0,10	0,53	0,63
7,15	116 + j 99	0,09	0,36	0,45
14,15	166 + j 80	0,13	0,14	0,27
21,2	182 + j 68	0,17	0,12	0,29
29,5	191 + j 63	0,23	0,08	0,31

Tab.2.4: Verluste PUT direkt am Senderausgang

### 3. Vergleich PUT mit Verlusten direkt am Senderausgang, zum PUT direkt an der Hühnerleiter

Frequenz MHz	Summe Verluste PUT an HL dB	Summe Verluste PUT Senderausgang dB
1,9	0,14	0,64
3,6	0,67	0,63
7,15	0,55	0,45
14,15	0,44	0,27
21,2	0,89	0,29
29,5	2,44	0,31

Tab.3.1: Gesamtverluste der Antennenanlage mit PUT an Hühnerleiter nach Teil 2, Tab. 2.1 und PUT am Senderausgang

Bei der angenommenen Antennenanlage mit Dipol 2 x 27 m und einer 15 langen 600  $\Omega$  Hühnerleiter ist der PUT am Senderausgang leicht im Vorteil, vor allem im 10 m Band, wo meistens eine Richtantenne zum verwendet wird.

Der geringe Vorteil des PUT am Senderausgang bedingt aber eine HF-mäßig hoch liegende Anpassschaltung mit alle ihren Nachteilen. Letztendlich zeigt sich auch hier, dass der Balun hinter einer asymmetrischen Anpassschaltung angeordnet werden sollte.

### 4. Zusammenfassung:

Legt man beim Betrieb einer Amateurfunkanlage das Augenmerk auf geringste Verluste und will man eine teure Endstufe einsparen, sollten nur Luftbalune eingesetzt werden. Nichtlineare Verzerrungen und Sättigungseffekt sind damit ausgeschlossen.

Wird ein Phasen-Umkehrtransformator eingesetzt, schaffe ich eine galvanische Verbindung zum Transceiver. Besonders gefährdet dabei ist der auf Empfindlichkeit konzipierte Empfängereingang. Blitzentladungen mit hohen Spannungsspitzen können ungehindert den Empfängereingang erreichen und diesen zerstören, während statische Aufladungen der Antenne allerdings gegen Masse abgeleitet werden, wenn als Anpassnetzwerk ein TP eingesetzt wird.

Ein Lufttransformator als PUT kann mit geringem Aufwand selbst hergestellt werden – siehe Bild 1.1.

Der Einsatz eines PUT direkt an der Hühnerleiter gefolgt von einer einfachen, verlustarmen und unsymmetrischen LC- Anordnung ist eine optimale Lösung. Ein LC-Netzwerk überstreicht den gesamt möglichen Impedanzbereich, was weder ein Pi- noch ein T-Filter kann /3/, wenn der Kondensator gegen Masse wahlweise vor oder hinter die Induktivität geschaltet werden kann.

DL3LH, Walter  
 wa-schau@t-online.de  
[dl3lh@gmx.de](mailto:dl3lh@gmx.de)  
[www.heide-holst.de](http://www.heide-holst.de)

### Literatur:

- /1/ The ARRL Antenna Book
- /2/ „Kurze Antennen“, Gerd Janzen, Frankh’sche Verlagshandlung, Stuttgart
- /3/ Passive Netzwerke zur Anpassung
- /4/ Pi-Filter mit Verlusten
- /5/ Die Antenne macht die Musik
- /6/ Die T-Anpassung, I, II
- /7/ Antennenmesstechnik, I -IV
- /8/ Transmission Line Transformers, Jerry Servick, W2FMI
- /9/ Induktivitäten I, II
- /10/ Der Phasenumkehrtrafo Teil 1, Teil 2

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.