

Transformatoren bei Hochfrequenz

Der Phasen-Umkehr- Transformator

Teil 2

**Mitteilungen aus dem
Institut für Umwelttechnik
Dr. Schau
DL3LH**

Vorwort:

Die Grundlagen für gekoppelte Spulen und Kreise im Bereich der Hochfrequenztechnik sind unter /8/ behandelt. In Anpassnetzwerken zum Übergang von unsymmetrisch zu symmetrisch wird, der „Phase-Reversal-Transformer“ eingesetzt, der trotz gleicher Wicklungsinduktivitäten für primär und sekundär eine Impedanztransformation erlaubt.

Durch die besondere Beschaltung von primärer und sekundärer Wicklung mit gleichzeitiger magnetischer Kopplung beider Wicklungen erfolgt eine Impedanzwandlung, die pauschal mit 1: 4 angegeben wird. Die Überraschung ist groß, wenn die Messtechnik das erwartete Ergebnis nicht bestätigt. Durch die besondere Beschaltung (Bild 1) ist die Lastimpedanz nicht nur magnetisch, sondern auch galvanisch mit der Quellimpedanz verbunden. Daher wird dieses Bauelement auch als Strom-Balun bezeichnet. Balun ist dabei die Abkürzung für

Balance to Unbalance – also der Übergang von einer symmetrischen Anordnung zu einer unsymmetrischen oder umgekehrt.

Eine wichtige Größe bei Transformatoren der Hochfrequenztechnik ist der Gegeninduktivitätskoeffizient M . Dieser beschreibt wie viel magnetischer Fluss einen sekundären Kreis trifft, wenn im primären Kreis ein Strom das magnetische Feld aufbaut. Ist $M = 0$, dann ist auch der sekundäre Fluss Null. Da die Richtung des magnetischen Flusses im Verbraucher Zählsystem (VZS) über die „Rechte Hand Regel“ mit dem Strom definiert ist, kann M auch einen negativen Zahlenwert annehmen. Der Balun wird in Amateurkreisen oftmals als das „Allheilmittel“ für viele Anpassungs- und Störungsprobleme eingesetzt. Was macht also dieser Phasen-Umkehr-Transformator wirklich und wie funktioniert dieser mit Verlusten?

1. Der PUT mit Verlusten und komplexen Lasten

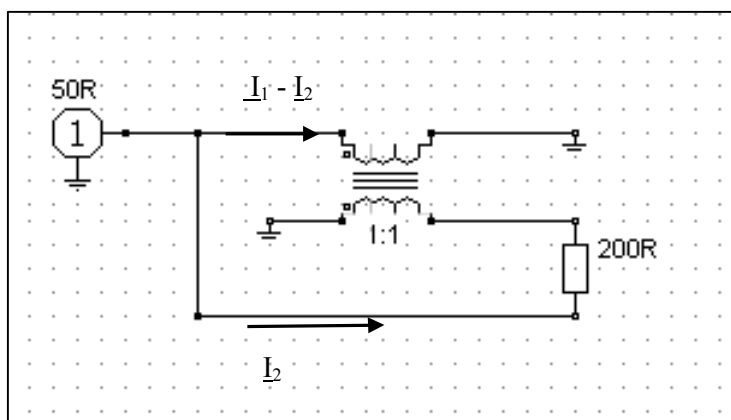


Bild 1: Grundsätzliche Anordnung eines Phasen-Umkehr-Transformators (PUT) mit einem Windungszahlverhältnis 1:1

Nach Teil 1 (Gl.8) ergab sich das Verhältnis der Ströme zu

$$(I_2 / I_1) = j\omega (L_1 + M) / (Z_2 + j\omega L) \quad (\text{Gl.1.1})$$

und aus (Gl.10) die Eingangsimpedanz des PUT

$$Z_{in} = j\omega L_1 + \omega^2 (L_1 + M)^2 / (Z_2 + j\omega L). \quad (\text{Gl.1.2})$$

Die Induktivitäten L_1 und L_2 werden bifilar gewickelt so das $L_1 = L_2$ wird und die Gesamtinduktivität nach (Gl.6)

$$L = 2 (L_1 + M). \quad (\text{Gl.1.3})$$

2. Der PUT mit Verlusten und komplexen Lasten

Schließen wir den Transformator mit einer komplexen Last $Z_2 = R_2 \pm jX_2$ ab und berücksichtigen die Verlustwiderstände r der zwei Induktivitäten, dann müssen (Gl.1.1), (Gl.1.2) und (Gl.1.3) durch diese Elemente ergänzt werden. Dabei ist zu berücksichtigen das auch nur 2 Verlustwiderstände auftreten können.

Das wir die Verluste berechnen wollen ist das quadr. Betragsverhältnis der Ströme von Bedeutung. Dieses ist im Hinblick auf (Gl.1.1)

$$(I_2 / I_1)^2 = r^2 + (\omega L_1 + \omega M)^2 / [(R_2 + r)^2 + [X_2 + 2\omega L_1 + 2\omega M]^2] \quad (\text{Gl.2.1})$$

und die Eingangsimpedanz, aufgeteilt nach Real- und Imaginärteil

$$R_{in} = r + [(R_2 + 2r)(r + \omega L_1 + \omega M)^2] / N \quad (Gl.2.2)$$

$$X_{in} = \omega L_1 - [(r + \omega L_1 + \omega M)^2 (X_2 + 2\omega L_1 + 2\omega M)] / N \quad (Gl.2.3)$$

mit dem Nenner

$$N = [R_2 + 2r]^2 + (X_2 + (X_2 + 2\omega L_1 + 2\omega M)^2) \quad (Gl.2.4)$$

Um einen Vergleich der Verluste zu haben, berechnen wir eine Antennenanlage mit Dipol 2 x 27 m und einer Hühnerleiter der Länge l = 15 m, 600 Ω

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.2.1

Die Verlustwiderstände der Spulen berechnen sich für kleine Verlustwinkel aus der Beziehung

$$r_1 = \omega L / Q \quad (Gl.2.5)$$

mit einer Leerlaufgüte in der Größenordnung Q = 50 bis 100. Wir rechnen mit Q = 50.

Die Verluste ergeben sich, wenn man die (Gl.2.1 bis 2.4) durch die mathematische Mühle dreht und dabei das Verhältnis der dem PUT zugeführten Wirkleistung zu der an der Last vorhandenen berechnet.

Die dem PUT zugeführte Wirkleistung berechnet sich sehr einfach aus der verfügbaren Leistung der Quelle und dem auf die Systemimpedanz bezogenen (50 Ω) Reflexionsfaktor zu

$$P_{in} = P_v (1 - r_e^2) \quad (Gl.2.6)$$

und die Wirkleistung an der Last aus der einfachen Beziehung

$$P_2 = I_2^2 * R_2 \quad (Gl.2.7)$$

Mit den Impedanzen am Eingang der Hühnerleiter nach Tab. 2.1 berechnen wir die Eingangsimpedanz des PUT bei einem Koppelfaktor k = 0,9

Frequenz MHz	Impedanz Eingang PUT Ω	Verlust PUT dB	Verlust LC Netzwerk dB	Summe Verluste dB
1,9	16,15 + j 82,97	0,13	0,10	0,23
3,6	108,86 + j 08,60	0,18	0,58	0,76
7,15	123,66 + j 18,59	0,10	0,54	0,64
14,15	260,18 + j 75,23	0,34	0,19	0,53
21,2	109,19 + j 21,16	0,84	0,14	0,98
29,5	47,47 + j 47,16	2,33	0,20	2,53

Tab.2.1 L₁ = 10 μH, k = 0,9

Wie Tab.2.1 zeigt ist der PUT ist ein Transformator mit geringen Verlusten. Von einer Transformation 1:4 kann natürlich nicht die Rede sein. Das gilt nur im Idealfall. Der PUT kann daher sehr gut am Eingang einer Hühnerleiter eingesetzt werden, allerdings mit dem Nachteil der galvanischen Kopplung.

Der Wert L_{1pot} = 10 μH ist ein guter Wert für die Induktivität. Auch hier gibt es für jedes Band einen optimalen Wert der Induktivität. D.h. wieder mal der Hinweis, dass eine Antennenanlage berechnet werden sollte, legt man Wert auf geringe Verluste.



Bild 2.1: Luft-PUT bei DJ9LI, Rudolf Wattenscheid hinter einem unsymmetrischen, kommerziellen Antennenkoppler, am Fußpunkt der Hühnerleiter, geschaltet

Oft wird in der Amateurliteratur vorgeschlagen die primäre Induktivität etwa zu 3 bis 4 uH zu wählen. Das bringt zwar geringe Verluste im PUT, dafür werden aber die Eingangsimpedanzen, die Lastimpedanzen für die Anpassschaltung zwischen PUT und Sender sehr niederohmig, verbunden mit größeren Verlusten im LC-Anpassnetzwerk.

3. Vergleich der Gesamtverluste bei unterschiedlichen Übertragern zwischen Anpassnetzwerk und Hühnerleiter

Die Antennenanlage Dipol 2x27 m in 12 m Höhe, Hühnerleiter l = 15 m, 600 Ohm, LC-Anpassnetzwerk $Q_L = 50$, $Q_c = 500$, Q der Balune 50.

F MHz	1:1 Balun dB	1:4 Balun dB	PUT dB	Guanella Wicklung dB	Guanella Leitg. dB
1,9	1,69	1,24	0,13	0,31	0,13
3,6	2,08	0,77	0,18	0,18	0,37
7,15	1,93	1,24	0,10	1,09	0,90
14,15	0,86	0,76	0,34	1,29	0,16
21,2	1,50	1,94	0,84	2,71	0,35
29,5	4,46	5,16	2,33	5,79	1,48

Tab.3.1: Vergleich der Verluste der untersuchten Balune 1:1, 1:4, Phasenumkehrtrafo PUT, Guanella Übertrager mit Wicklung, Guanella Übertrager mit Leitungen

Die Tab.3.1 braucht sicherlich nicht kommentiert werden. Die geringsten Verluste der gesamten Antennenanlage werden mit einem Guanella Übertrager in der Ausführung mit Leitungen erreicht. Mit der Symmetrierung nach DL3LH werden die Verluste weiter reduziert, nur dazu ist eine gute Erde am LC-Netzwerk erforderlich /9/.

Zusammenfassung:

Legt man beim Betrieb einer Amateurfunkanlage das Augenmerk auf geringste Verluste, sollten nur Luftbalune eingesetzt werden. Nichtlineare Verzerrungen und Sättigungseffekte sind damit ausgeschlossen. Wird ein Phasen-Umkehrtransformator eingesetzt, schaffe ich eine galvanische Verbindung zum Transceiver. Besonders gefährdet dabei ist der auf Empfindlichkeit konzipierte Empfängereingang. Statische Aufladungen, Blitzentladungen mit hohen Spannungsspitzen können ungehindert den Empfängereingang erreichen und diesen zerstören.

Der reale PUT macht alles, nur nicht das was ihn andichtet wird. Die „Unzulänglichkeiten“ des Balun können aufgefangen werden, wenn der Balun am Ausgang der Anpassschaltung betrieben wird, außerdem reduzieren sich die Verluste im PUT. In /5/ ist gezeigt, dass auch der normale Balun am Ausgang der Anpassschaltung zu geringeren Verlusten in der gesamten Antennenanlage führt. Ein Lufttransformator kann mit geringem Aufwand selbst hergestellt werden. Zwei isolierte, verdrehte

Leitungen werden auf einem Wickelkörper von $d = 50$ bis 60 mm gewickelt, die Anzahl der Windungen beträgt $n = 9$ bis 10 .

Der Einsatz eines PUT am Ausgang einer Anpassschaltung erlaubt außerdem den Einsatz einer einfachen, verlustarmen und unsymmetrischen LC-Anordnung, die den gesamtmöglichen Impedanzbereich überstreicht, was weder ein Pi- noch ein T-Filter mit Verlusten kann /3/.

In Teil 3 untersuchen wir das Verlustverhalten wenn der PUT direkt am Senderausgang betrieben wird.



DL3LH, Walter
wa-schau@t-online.de
dl3lh@gmx.de
www.heide-holst.de

Literatur:

- /1/ The ARRL Antenna Book
- /2/ Passive Netzwerke zur Anpassung, DL3LH
- /3/ Pi-Filter mit Verlusten, DL3LH
- /4/ Die Antenne macht die Musik, DL3LH
- /5/ Die T-Anpassung, DL3LH
- /6/ Antennenmesstechnik, DL3LH
- /7/ Induktivitäten, DL3LH
- /8/ Gekoppelter Spulen und Kreise
- /9/ Symmetrierung nach DL3LH, ohne Balun
- /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.