

Transformatoren bei Hochfrequenz

Mythos „Balun“

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

Vorwort:

Zwei oder mehr Stromkreise zwischen denen ein Energietausch statt findet, sind miteinander verkoppelt. Findet der Energietausch über magnetische Felder statt, so sind diese Anordnungen magnetisch gekoppelt. Man spricht allgemein von gekoppelten Kreisen mit einem Primär- und einem Sekundärkreis oder auch von Transformatoren. Je nach dem ob die eine Seite der Wicklung an Masse liegt oder nicht, spricht man von einem „Balun“ oder einem „Unun“. Der Balun ist die Abkürzung für Balanced to Unbalanced – also der Übergang von einer symmetrischen Anordnung zu einer unsymmetrischen. Beim „Unun“ entsprechend von unsymmetrisch auf unsymmetrisch. Eine weitere Eigenschaft eines Transformators in hochfrequenztechnischen Anwendungen ist das Übersetzungsverhältnis $ü = x$ mit $x = 1, 2, 3, 4$ usw. Eine andere wichtige Eigenschaft ist der Koppelfaktor k . Dieser beschreibt wie stark der primäre und sekundäre Kreis miteinander verkoppelt ist. Der Balun wird in Amateurkreisen oftmals als das „Allheilmittel“ für viele Anpassungs- und Störungsprobleme eingesetzt. Dazu gibt es Bauanleitungen in ausreichender Zahl /8/, doch was macht ein Balun wirklich?

1. Der ideale Transformator

Der ideale Transformator ist unendlich breitbandig und transformiert die Lastimpedanz mit dem Quadrat des Übersetzungsverhältnisses in den Primärkreis. Der ideale Transformator dient nur zum grundsätzlichen Verständnis magnetisch gekoppelter Kreise. Leider gibt es ihn nicht.

1.1 Der ideale Transformator mit einer reellen Last

Per Definition ist der ideale Transformator frequenzunabhängig. Eine reelle Last wird mit dem Quadrat des Übersetzungsverhältnisses in den Primärkreis transformiert. Wir erhalten

$$R_1 = R_2 / ü^2 \quad (\text{Gl 1})$$

Beispiel 1.1

Ein idealer Balun mit einem Übersetzungsverhältnis $ü = 2$ ist mit einem reellen Lastwiderstand von $R = 200 \Omega$ abgeschlossen. Welcher Eingangswiderstand kann im Primärkreis erwartet werden?

Nach (Gl 1) wird

$$R_1 = 200 \Omega / 4 = 50 \Omega.$$

Die Benennung des Balun mit dem Zusatz 1: x ist nicht einheitlich. Manchmal wird z.B. mit „Balun 1 zu 4“ gleichzeitig das Widerstandsverhältnis angesprochen. Dabei ist mit 1 zu 4 gemeint, dass dieser Balun die Widerstände im Verhältnis 1 zu 4 übersetzt, das Übersetzungsverhältnis ist dann 1: 2.

1.2 Der ideale Transformator mit einer komplexen Last

Liegt sekundär eine komplexe Last $\underline{Z} = R \pm j X$ vor, transformiert der ideale Transformator diese komplexe Last in den primären Kreis entsprechend (Gl 1). Daraus wird

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 / ü^2 \quad (\text{Gl 2})$$

Beispiel 1.2

Ein idealer Balun 1:4 mit einem Übersetzungsverhältnis $\ddot{u} = 2$ ist mit der komplexen Last $\underline{Z} = (200 + j 100) \Omega$ abgeschlossen. Welche Eingangsimpedanz zeigt sich an den Klemmen des Primärkreises?

Die Eingangsimpedanz nach (Gl 2) wird

$$Z_1 = (200 + j 100) / 4 = (50 + j 25) \Omega$$

und ist die Reihenschaltung eines reellen Widerstandes von 50Ω mit einem induktiven von 25Ω . Auf der sekundären Seite war der induktive Widerstand $X_L = 100 \Omega$ und bei der Frequenz $f = 3.6 \text{ MHz}$ entsprechend einer Induktivität von $L = 4.42 \text{ uH}$. Auf der Primärseite - nach der Transformation - ist ein induktiver Widerstand von $X_L' = 25 \Omega$ vorhanden, der bei der Frequenz $f = 3.6 \text{ MHz}$ einer Induktivität von $L' = 1.105 \text{ uH}$ entspricht. Die Induktivität wurde durch den Transformator auf ein $1/4$ der sekundären Induktivität verkleinert. Bei Kapazitäten kehren sich die Verhältnisse um. Sekundäre Kapazitäten werden um den Faktor \ddot{u}^2 vergrößert in den primären Kreis transformiert.

Zum allgemeinen Verständnis der Funktion eines Transformators brauchen wir uns nur diese einfachen Zusammenhänge merken. Induktivitäten werden genau wie reelle Widerstände transformiert und mit dem Quadrat des Übersetzungsverhältnisse in den Primärkreis übertragen, Kapazitäten mit dem reziproken Wert des Übersetzungsverhältnisses.

Hat die Primärseite mehr Windungen als die Sekundärseite wird das Übersetzungsverhältnis $\ddot{u} < 1$. Wir vertauschen gedanklich Ein- und Ausgang und können oben genannt Überlegungen direkt übernehmen. Die Transformation erfolgt dann nicht von rechts nach links, sondern in umgekehrter Reihenfolge. Bild 1 zeigt den Verlauf der Eingangsimpedanz $\underline{Z} = (50 + j 25) \Omega$ im Smith-Chart für $f = 1 \text{ KHz}$ bis 1 GHz .

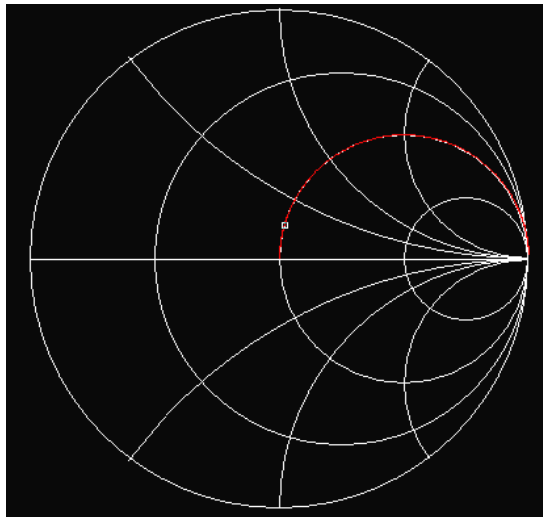


Bild 1: Eingangsimpedanz eines idealen Transformators 1:4 bei induktiver Belastung mit $\underline{Z} = (200 + j 100) \Omega$, Referenz ist 50Ω

Bemerkung

Manchmal wird das Übersetzungsverhältnis auch als $\ddot{u}' = 1/\ddot{u}$ definiert. Die Funktionsweise des Transformators ändert sich dadurch natürlich nicht. In die Berechnungen fließt dann nur diese andere Definition ein.

Wir bleiben bei der oben genannten Definition, da diese sich in Amateurkreisen eingebürgert hat. Dabei bedeutet z.B. in „1:4“ die „1“ die primäre Seite und die „4“ die sekundäre Seite. Ein Guanella Transformator 1:4 transformiert theoretisch von primär 50Ω auf sekundär 200Ω . /8/. Das Übersetzungsverhältnis ist $\ddot{u} = 2$.

2. Der reale Transformator

Die Verhältnisse beim **idealen** Transformator sind leicht zu übersehen. Der reale Transformator erfordert einen hohen mathematischen Aufwand. Der primäre und der sekundäre Kreis haben Wickelinduktivitäten, es stellen sich Streu- und Wickelkapazitäten ein, die Wicklungen haben Wirkwiderstände und der Skin-Effekt muss berücksichtigt werden. Werden Kerne aus Eisen etc. eingesetzt, treten weitere auch nichtlineare Effekte hinzu. Außerdem ist nicht der gesamte Fluss des Primärkreises mit dem Sekundärkreis verkoppelt, es sind Streuflüsse vorhanden, die den Koppelfaktor kleiner als 1 werden lassen. Hier sei auf die umfangreiche Literatur von R. Feldtkeller und auf /5/ verwiesen. Um trotzdem Einsicht in das Transformationsverhalten eines Balun zu erhalten, helfen berechnete Impedanzverläufe im Smith-Chart.

Bild 2 zeigt bspw. die Eingangsimpedanz eines realen 1: 4 Balun, der **nur** mit einer reellen Impedanz von $200\ \Omega$ abgeschlossen ist und einen Koppelfaktor von $k = 1$ hat. Der Verlauf der Eingangsimpedanz in Bild 2 und Bild 1 ist identisch, obwohl bei 2 nur ein reeller Abschluss von $200\ \Omega$ vorhanden ist. Das Impedanzverhalten wird verständlich, weil die sekundäre und die primäre Induktivität die „Rolle“ der induktiven Serien-Belastung nach Beispiel 1.2 übernehmen. Daher muss der Impedanzverlauf für $k = 1$ identisch sein.

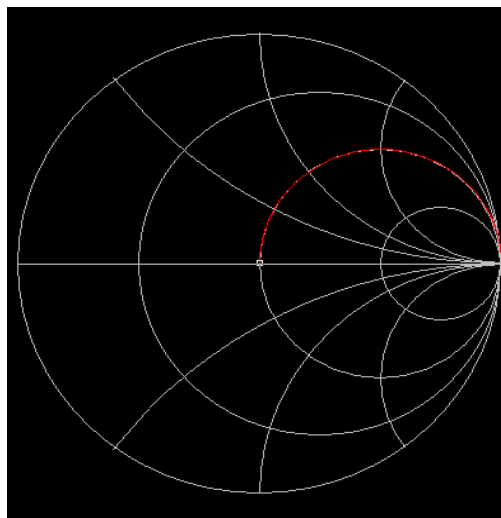


Bild 2: Verlauf der Eingangsimpedanz eines realen 1: 4 Balun belastet mit einem reellen Widerstand von $200\ \Omega$, Koppelfaktor $k = 1$, Frequenz 1 KHz bis 1 GHz

Völlig anders gestalten sich die Impedanz-Verhältnisse bei einem praxisnahen Koppelfaktor $k < 1$. Bild 3 zeigt den Verlauf der Eingangsimpedanz bei der gleichen reellen Belastung von $200\ \Omega$ aber einem praxisnahen Koppelfaktor $k = 0.9$.

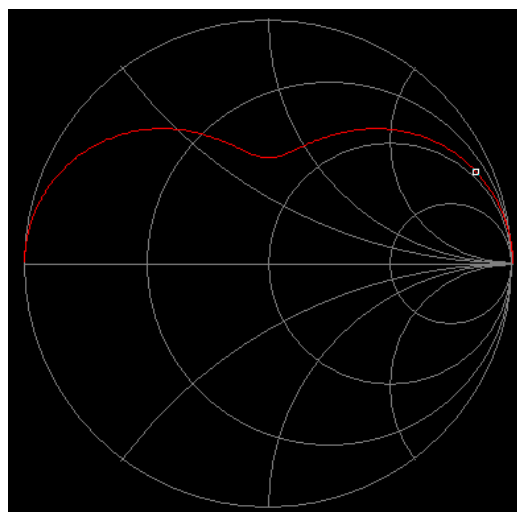


Bild 3: Impedanzverlauf eines realen 1:4 Balun bei ohmscher Belastung und bei $k = 0.9$

Wie uns der Impedanzverlauf in Bild 3 zeigt, kann von Anpassung keine Rede sein. Es nähert sich bei hohen Frequenzen der Realteil allerdings immer mehr dem Wert von 50 Ω . Bei der Markerfrequenz $f = 3.6$ MHz ist bspw. die Eingangsimpedanz $\underline{Z} = (40 + j 229) \Omega$. Daraus berechnet sich der Betrag des Eingangsreflexionsfaktors im 50 Ω Systems zu

$$|\underline{r}| = 0.9315$$

und das eingangsseitige VSWR wird $S_{50} = 28.19$ – also weit weg von einer Anpassung, obwohl wir einen rein ohmschen Widerstand von 200 Ω als Last haben und die Transformation 1: 4 sein sollte. Der Return Loss, als Maß für die Qualität der Anpassung, berechnet sich bezogen auf die Systemimpedanz zu

$$R_L = -20 \log (0.9315) \text{ dB} = 0.6155 \text{ dB}$$

und ist bescheiden niedrig.

Bei einer verfügbaren Leistung des Senders von $P_v = 500 \text{ W}$ würden gerade mal $P_L = 500 \text{ W} (1 - r^2) = 500 (1 - 0.867) \text{ W} = 66.5 \text{ W}$ den Lastwiderstand erreichen. Der Transmission-Loss wird $T = -10 \log (1 - r^2) = -10 \log (1 - 0.867) = 8.76 \text{ dB}$ – also viel zu hoch und nicht tolerabel. Zusätzlich hat der reale Balun noch Verlustwiderstände im primären und sekundären Kreis, die die Wirkleistung an der Last verringern.

Wird der reale Balun jetzt bspw. mit einer induktiven Last $\underline{Z} = (200 + j 100) \Omega$ abgeschlossen, erhalten wir den Impedanzverlauf nach Bild 4 und

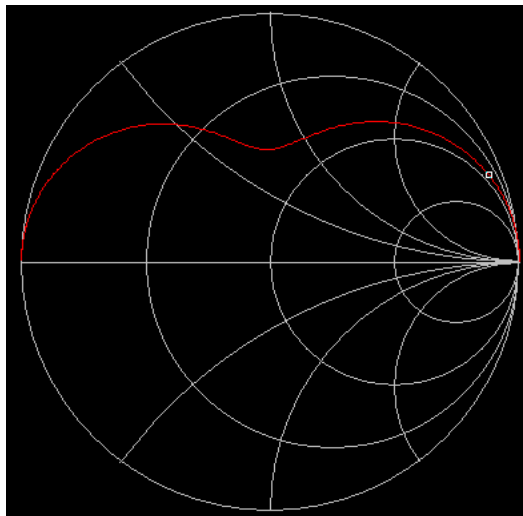


Bild 4

einen ähnlichen Verlauf wie in Bild 3. Dabei zeigt sich wieder, dass im gesamten Frequenzbereich keine Anpassung vorhanden ist. Mit zunehmendem Koppelfaktor k schnürt sich der wellenförmige Verlauf immer mehr ein und erreicht bei $k = 1$ in der Mitte - beim 50 Ω Punkt - die reelle Achse. Bei der markierten Frequenz $f = 3.6$ MHz ist die Eingangsimpedanz z.B. $\underline{Z} = (39 + j 248) \Omega$. Daraus berechnen wir den Betrag des Reflexionsfaktors zu

$$r = 0.9422$$

und das eingangsseitige Stehwellenverhältnis bezogen auf 50 Ω wird $S_{50} = 33.57$. Der Return Loss ist

$$R_L = -20 \log |\underline{r}| = -20 \log 0.9422 = 0.5175 \text{ dB}$$

und der Transmission Loss $T_L = 9.49 \text{ dB}$ – beides traurige Werte.

Schalten wir zwischen Sender und Balun ein LC-Anpassnetzwerk zur Transformation auf 50 Ω , dann berechnet sich der Verlust zu $L = 0.34 \text{ dB}$.

Hier zeigt sich deutlich, dass der Balun an den Ausgang der Anpassschaltung angeordnet werden muss um die komplexen, frequenzabhängigen Eigenschaften des Balun auszugleichen. Ein weiterer Vorteil ist die Einfachheit der LC - Anpassung in unsymmetrischer Form. Symmetrische, aufwändige Anpassnetzwerke können entfallen.

Untersuchen wir noch den realen Balun bei einer kapazitiven Last von $\underline{Z} = (200 - j 100) \Omega$ und einem Koppelfaktor $k = 0.9$. Den Verlauf der Eingangsimpedanz zeigt Bild 5

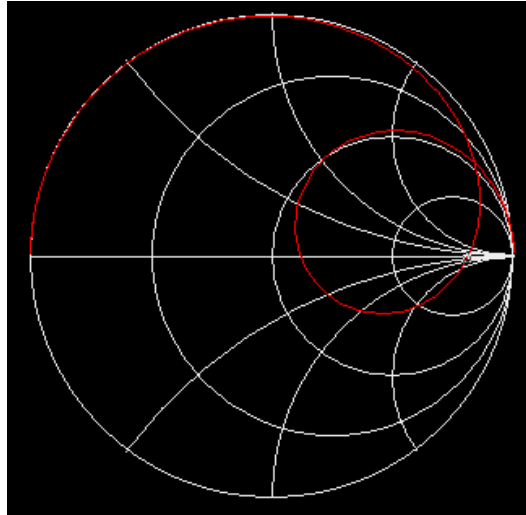


Bild 5: Eingangsimpedanz eines 1:4 Balun bei kapazitiver Belastung $\underline{Z} = (200 - j 100) \Omega$

Erst jetzt treten durch den kapazitiven Anteil der Lastimpedanz und den vorhandenen Induktivitäten Resonanzen auf. Bei der Serien-Resonanz nach Bild 5 stellt sich z.B. ein reeller Wert von $R = 64 \Omega$ ein. Daraus berechnen wir den Betrag des Eingangsreflexionsfaktors

$$r = 14/114 = 0.1228$$

und der Return-Loss wird $R_L = 18.21$ dB. Dieser Wert relativ gute Wert gilt aber nur bei einer einzigen Frequenz und für einen Koppelfaktor von $k = 0.9$!

Meist wird in der Praxis ein Koppelfaktor $k = 0.9$ nicht erreicht. Daher berechnen wir bei $k = 0.7$ den Impedanzverlauf neu und markieren die Frequenz $f = 3.6$ MHz. Den Verlauf zeigt Bild 6. Bei $f = 3.6$ MHz stellt sich eine Impedanz von $\underline{Z} = (27 + j 216) \Omega$ ein.

Würden wir jetzt eine einfache LC-Anpassschaltung zur Transformation auf 50Ω einsetzen, wäre deren Verlust nur $L = 0.37$ dB. Auch hier zeigt sich, dass der Balun an den Ausgang der Anpassschaltung gehört und nicht an den Eingang.

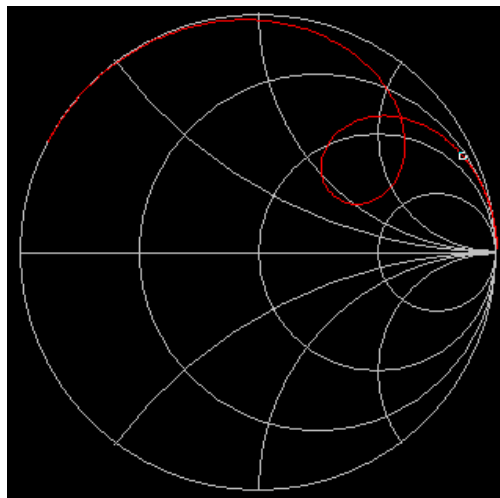


Bild 6: Realer Balun 1: 4 bei kapazitivem Abschluss und einem Koppelfaktor $k = 0.7$

Um nochmals der Frage nachzugehen an welcher Stelle der Balun/Lufttransformator liegen sollte, untersuchen wir das Impedanzverhalten eines Balun am **Eingang** einer Anpassschaltung. Eingangsseitig ist dieser Balun mit $50\ \Omega$ reell - dem Innenwiderstand des Senders - abgeschlossen. Welche Impedanzen sieht die Anpassschaltung, wenn z.B. ein 1:4 Balun eingesetzt wird? Wir schauen also in den Balun in Richtung Senderausgang von der $200\ \Omega$ Seite aus.

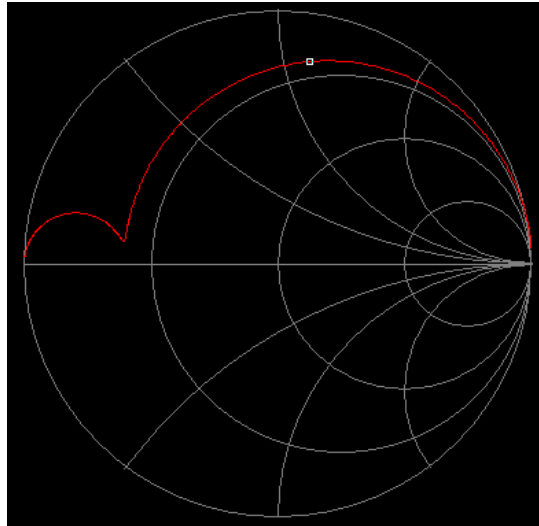


Bild 7: Impedanzverlauf eines 1:4 Balun mit reellem Abschluss $50\ \Omega$, Bezugsimpedanz ist jetzt $200\ \Omega$, weil wir von der $200\ \Omega$ in den Balun „sehen“

Den berechneten Impedanzverlauf für einen Koppelfaktor $k = 0.99$ zeigt uns Bild 7. Es ergibt sich selbst bei einem Koppelfaktor $k = 0.99$ (der in der Praxis nicht erreicht werden kann) dieser katastrophale Impedanzverlauf. Alle Impedanzen liegen im induktiven Bereich, keine Spur einer reellen Impedanz von $200\ \Omega$, wie eigentlich zu erwarten. Es ist so, als würde man ein Haus auf einen schwimmenden Boden bauen. Hier zeigt sich noch deutlicher, dass der Balun/Transformator an den Ausgang der Anpassschaltung gehört, wie von amerikanischen OM's immer wieder vorgeschlagen.

Untersuchen wir noch den 1:1 Transformator. Vielleicht geht es damit besser?

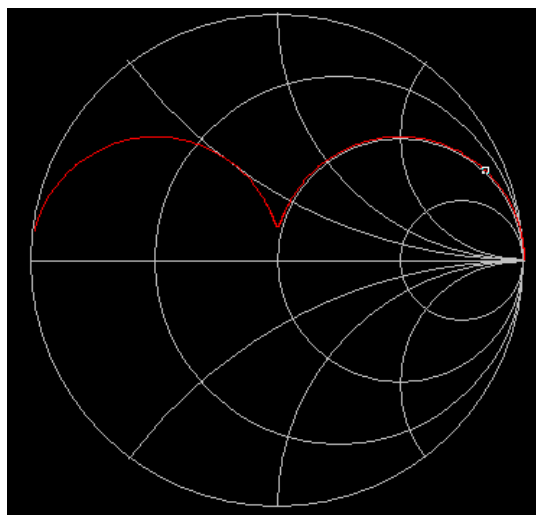


Bild 8: Impedanzverlauf eines 1:1 Balun bei einem Koppelfaktor $k = 0.99$

Wie Bild 8 zeigt, hat auch der 1:1 Balun/Unun keinen grundsätzlich anderen Impedanzverlauf. Die Impedanzkurve schnürt sich mit zu nehmenden Koppelfaktor immer mehr beim $50\ \Omega$ Punkt ein.

Bei $k = 1$ sieht der Impedanzverlauf wie zwei „Halbschalen“ aus. Bei der Markerfrequenz $f = 3.6 \text{ MHz}$ liegt die Impedanz z.B. bei $\underline{Z} = (49 + j 229) \Omega$. Im gesamten Frequenzbereich wird keine Anpassung erreicht.



Bild 9 zeigt einen berechneten Luftbalun für 160 – 10 m

Fazit:

Für den Funkbetrieb sollten nur Luftbalune/Unune eingesetzt werden. Der reale Balun/Unun macht alles, nur nicht das was man ihm andichtet. Die Unzulänglichkeiten des Balun können aufgefangen werden, wenn der Balun am Ausgang der Anpassschaltung betrieben wird. Man kann zeigen, dass ein Balun am Ausgang der Anpassschaltung zu minimalen Verlusten der Antennenanlage führt /5/. Ein Lufttransformator kann mit geringen Aufwand selbst hergestellt werden /5/. Zwei isolierte, verdrehte Leitungen werden auf einem Wickelkörper von $d = 50 \text{ mm}$ gewickelt, die Anzahl der Windungen beträgt $n = 9$. Der Einsatz eines Balun/Transformators am Ausgang der Anpassschaltung erlaubt außerdem den Einsatz der einfachen, unsymmetrischen LC- Anordnung mit geringen Verlusten. Aufwändige symmetrische Anpassnetzwerke und Symmetrierglieder mit Ringkernen können entfallen.

DL3LH, Walter
schau@rs-systems.info

Literatur:

- /1/ The ARRL Antenna Book
- /2/ „Passive Netzwerke zur Anpassung“, W. Schau, DL3LH, www.ham-on-air.de
- /3/ „Pi-Filter mit Verlusten“, W. Schau, DL3LH, www.ham-on-air.de
- /4/ „Die Antenne macht die Musik“, Dr. Schau, DL3LH, www.ham-on-air.de
- /5/ „Die T-Anpassung“, W. Schau, DL3LH, www.ham-on-air.de
- /6/ „Antennenmesstechnik I/II/III“, W. Schau, DL3LH, www.ham-on-air.de
- /7/ “Transmission Line Transformers”, Jerry Servick, W2FMI

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.