

Antennen Tuning VI

**Belastbarkeit von
Antennenzuleitungen
im KW - Bereich**

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

Vorwort:

Verluste auf der Zuleitung zur Antenne werden durch die Dämpfung bei totaler Anpassung dem „Matched-Line-Loss“ und durch die Zusatzdämpfung durch das VSWR verursacht /2, 10/. Was oftmals nicht berücksichtigt wird ist die Tatsache, dass die elektrische Belastbarkeit der Antennenzuleitung wesentlich vom VSWR auf der Leitung abhängt.

Um Durchschläge zu vermeiden ist die Kenntnis des VSWR auf der Antennenzuleitung wichtig. Dieses kann durch Messung der Eingangsimpedanz der Leitung oder durch Messung des VSWR direkt bestimmt werden.

Die Messung des VSWR bei koaxialen Leitungen gestaltet sich sehr einfach mittels der käuflichen oder selbstgebauten VSWR-Meter. Die Messung des VSWR bei Zweidrahtleitungen ist prinzipiell genau so einfach, nur sind Stehwellenmessgeräte für Zweidrahtleitungen in Amateur Hand meist nicht vorhanden.

Hier bietet sich der Umweg über die Messung der Eingangsimpedanz mit den üblichen Impedanzmessgeräten wie CIA, MfJ, Vectronics, oder HP, R&S usw. an.

1. Die Maximal übertragbare Leistung über eine verlustlose Zuleitung bei erhöhtem VSWR

Stehende Wellen vermindern die übertragbare Leistung auf einer Leitung, weil die durch die stehenden Wellen vorhandene Blindleistung die Leitung ebenso belastet, wie die zu übertragene Wirkleistung. Die Wirkleistung setzt sich zusammen aus der hinlaufenden und der rücklaufenden Leistung (mit Effektivwerten), also

$$P = U_{\max} * U_{\min} / Z_0 = P^+ - P^- \quad (\text{Gl.1})$$

Die maximale Wirkleistung, die übertragen werden kann, ist begrenzt durch die Durchbruchspannung der Leitung $\underline{U} = U_b$. Daraus ergibt sich

$$P_{\text{Wirk}} = U_b^2 / (S * Z_0) \quad (\text{Gl.2})$$

als die maximal übertragbare Leistung. Dabei ist U_b der Effektivwert der Spannung, der mit einem ordi-nären HF-Voltmeter gemessen wird.

Ebenso erhält man den Effektivwert des maximalen Stromes auf der Leitung zu

$$P_{\text{Wirk}} = I_{\max}^2 * Z_0 / S \quad (\text{Gl.3})$$

Beispiel 1.1

Bei der Frequenz $f = 1,9$ MHz sollen auf einer 20 m langen 600- Ω -Leitung $P = 750$ W übertragen werden. Die Antennenimpedanz sei $Z_2 = (3 + j 200) \Omega$ (Beispiel aus Faltdipol 2 x 10 m, /9/).

Mit dem komplexen Wellenwiderstand $Z_0 = (600 - j 1,17) \Omega$ bei der Betriebsfrequenz, berechnet sich das antennenseitige Stehwellenverhältnis zu $S = 255 / 2$.

Um die Rechnung nicht zu komplizieren sei die Leitung vorerst als verlustlos angenommen, d.h. das VSWR ist auf der gesamten Leitung konstant.

Die maximale Effektiv-Spannung auf der Leitung ist nach Umstellung der (Gl.2)

$$U_{\max} = \sqrt{P * Z_0 * S} = \sqrt{750 \text{ W} * 600 \Omega * 255}$$

$$U_{\max} = 10712 \text{ V.}$$

Die Spannung $U = 10712$ V auf der Leitung darf die Durchbruchspannung nach Tab. 1 nicht überschreiten, die bei einer sauber geführten Zweidrahtleitung $U_{\max} = 12000$ V ist.

Für die elektrische Belastbarkeit der Leitung ist allerdings die Spitzenspannung maßgeblich. Diese ist bei sinusförmigen Vorgängen Wurzel 2 mal größer und auf einer 600 Ω Leitung immerhin $U_{\text{Spitze}} = 16970$ V.

Das Beispiel zeigt deutlich wie wichtig die Kenntnisse der Verhältnisse auf der Antennenzuleitung sind, bevor eine Endstufe gedankenlos „angesaftet“ wird.

Der Antennenstrom bei $f = 1,91$ MHz wird aus der Leistungsbeziehung $I_{\text{ant}} = \sqrt{P / R} = \sqrt{750 \text{ W} / 3 \Omega} = 15,81$ A und daraus die Gesamtspannung an der Antennenimpedanz durch vektorielle Addition der Einzelspannungen /2/ $U_{\text{ges}} = 3162$ V.

Welche Ströme treten auf der 600 Ω Leitung auf ?

Der maximale Strom auf der Leitung ist $I_{\max} = 10712 \text{ V} / 600 \Omega = 25,25$ A. Der minimale Strom wird entsprechend $I_{\min} = I_{\max} / S = 25,25 / 255 = 0,0990$ A oder rund 99 mA.

Auch diese Ströme sind Effektivwerte, also Ströme die mit einem normalen HF-Instrument gemessen werden können.

Beispiel 1.2

Die maximale Spannung auf der koaxialen Leitung RG213 ist nach Tab. 1 $U_{eff} = 3600$ V. Wir messen auf der Zuleitung zur Antenne ein $VSWR = 8$.

Nach (Gl.2) berechnet sich daraus die maximale Übertragbare Leistung zu $P_{max} = 3600^2 / 50 \Omega * 8 = 32,4$ KW, wenn nicht der auftretende Antennenstrom am Innen- oder Außenleiter des Koaxkabels die Leistung begrenzen würde.

Der Durchmesser des Innenleiters des RG213 ist $D = 2.5$ mm und die Eindringtiefe nach /11/ bei der Frequenz $f = 1,9$ MHz nur $\delta = 0,0431$ mm.

Daraus berechnet sich die tatsächliche Fläche für den HF-Strom zu $A = 0,3720$ mm². Rechnet man mit etwa 25 A / mm² als Strombelastung des Kupferleiters ohne zusätzliche Kühlung, dann ist der maximale zulässige HF-Strom auf dem Innenleiter der Koax-Leitung $I_{max} = 9,3$ A. Nach (Gl.3) darf bei einem $VSWR$ von $S = 8$ die Leistung von $P_{wirk} = 540$ W nicht überschritten werden.

Gesondert müsste noch die Strombelastung im Außenleiter des Koaxkabels berechnet werden. Der niedere Wert von beiden ist dann maßgeblich für die Grenzbelastung des Kabels.

2. Elektrische Belastung der realen Leitung bei erhöhtem VSWR

Bei der realen, verlustbehafteten Leitung tritt das höhere $VSWR$ immer am Fußpunkt der Antenne auf und ist maßgebend für die elektrische Belastung der Antennenzuleitung.

Da nur in seltenen Fällen der Fußpunkt der Antenne für eine Messung des $VSWR$ zugänglich ist, reicht bei bekannter Länge der Zuleitung eine Messung der Eingangsimpedanz.

Mit der komplexen, frequenzabhängigen Impedanz der Antenne $Z_A = R_A \pm j X_A$ und dem komplexen Wellenwiderstand Z_0 der Antennenzuleitung bestimmt sich der antennenseitige Reflexionsfaktor

$$\underline{r}_2 = (Z_A - Z_0) / (Z_A + Z_0). \quad (Gl.4)$$

und nach /2/ daraus der Gesamt-Verlust auf der Antennenzuleitung

$$T_L = 10 \log [(a^2 - |\underline{r}_2|^2) / a (1 - |\underline{r}_2|^2)] \text{ dB} \quad (Gl.5)$$

Wird in (Gl.5) der Reflexionsfaktor $\underline{r}_2 = 0$ (Anpassung) wird $T_L = a$. „a“ bezeichnet den Verlust bei vollständiger Anpassung (M_L). Im englischsprachigen Raum spricht man von „Matched-Line-Loss“.

Aus (Gl.5) wird für $\underline{r}_2 = 0$ $M_L = 10 \log(a)$ und durch Umkehrung der logarithmischen Funktion

$$a = 10^{ML/10}. \quad (Gl.6)$$

Auch hier zeigt sich, dass vor Einschalten einer Endstufe ein wenig Überlegung notwendig und sinnvoll ist.

| Kabeltyp | Durchbruchspannung U _{eff} /V |
|-----------------|---|
| RG 58 A | 1400 |
| RG 141 | 1400 |
| RG 213 | 3600 |
| RG 223 | 1700 |
| RG 59 PE | 300 |
| 9913 Belden | 600 |
| 9914 Belden | 600 |
| 1/2 Zoll | 2500 |
| 3/4 Zoll | 4000 |
| 7/8 Zoll | 4000 |
| DL 450 Ω | 10000 |
| DL 600 Ω | 12000 |

Tab. 1: Durchbruchspannung bekannter Kabeltypen

Ist also der „Matched-Line-Loss“ gegeben, so errechnet sich daraus der lineare Faktor zu

$$a = 10^{ML/10}. \quad (Gl.7)$$

Der so definierte Dämpfungsfaktor a ist größer als Eins.

Die Dämpfungswerte für vollständige Anpassung können Tabellen der Hersteller entnommen werden und sind in dB pro 100 m und für eine bestimmte Frequenz angegeben.

Hat man diese Werte nicht zur Hand kann bei kurz geschlossener Antennenzuleitung der Return-Loss ermittelt werden. Dabei gilt nach /7/

$$M_L = R_{LK} / 2 \quad (Gl.8)$$

Der „Matched-Line-Loss“ ist die Hälfte des ermittelten Return-Loss, unabhängig von der Impedanz des Systems.

Aus (Gl.7) kann somit der Faktor a mit dem Taschenrechner berechnet werden.

Die Gesamtdämpfung nach (Gl.5) wird für $a = 1$ (verlustlose Leitung) unabhängig vom antennenseitigen Reflexionsfaktor, d.h. je verlustärmer eine Leitung ist, desto geringer sind auch die Verluste durch stehende Wellen.

Daher haben verlustarme Doppelleitungen Vorrang vor Koaxkabeln.

Eine erste Übersicht über den Zusammenhang zwischen VSWR, Reflexionsfaktor und Return-Loss zeigt Tabelle 2.

| R _L in dB | VSWR | Reflexionsfaktor <u>r</u> |
|----------------------|--------|--------------------------------|
| 32.0 | 1.051 | 0.025 |
| 26.0 | 1.105 | 0.050 |
| 22.5 | 1.162 | 0.075 |
| 20.0 | 1.222 | 0.100 |
| 18.1 | 1.286 | 0.125 |
| 16.5 | 1.353 | 0.150 |
| 15.1 | 1.424 | 0.175 |
| 14.0 | 1.500 | 0.200 |
| 13.0 | 1.581 | 0.225 |
| 12.0 | 1.667 | 0.250 |
| 10.5 | 1.857 | 0.300 |
| 9.1 | 2.077 | 0.350 |
| 8.0 | 2.333 | 0.400 |
| 6.9 | 2.636 | 0.450 |
| 6.0 | 3.000 | 0.500 |
| 4.4 | 4.000 | 0.600 |
| 3.1 | 5.667 | 0.700 |
| 1.9 | 9.000 | 0.800 |
| 0.9 | 19.000 | 0.900 |

Tab. 2: Return-Loss, VSWR und Reflexionsfaktor

Für die Verluste ist das antennenseitige VSWR bzw. der Reflexionsfaktor an der Antenne verantwortlich. Dieser kann aus dem Reflexionsfaktor am Eingang der Leitung durch die Beziehung

$$|r_1| = |r_2| / a \tag{G.9}$$

berechnet werden.

Wird der Return-Loss als Grundlage für Berechnung des eingangsseitigen Reflexionsfaktors genutzt, muss dieser auf den Wellenwiderstand der verwendeten Leitung umgerechnet werden /2/.

Für den Return-Loss gilt der Zusammenhang

$$R_L = 20 \log (1 / |r|). \tag{Gl.10}$$

Daher ist es besser die Beziehung nach (Gl.9) zu verwenden.

Wegen der großen Fehler bei Differenzwerten in (Gl.4) muss allerdings mit mindestens 6 - 8 Stellen hinter dem Komma gerechnet werden. Hier bietet sich das Programm Excel oder ein guter Taschenrechner an.

Beispiel 2.1

Bei der Frequenz $f = 3,6$ MHz wird bei kurzgeschlossener Antennenzuleitung ein Return-Loss von $R_{LK} = 0,042$ dB gemessen. Nach (Gl. 8) ist der Matched-Line-Loss $M_L = 0,021$ dB und der Dämpfungsfaktor nach (Gl.7) $a = 10^{0,0021} = 1,004847138$.

Da die Zweidrahtleitung eine elektrische Länge von $l = 20$ m hat, berechnet sich der Verlust bei totaler Anpassung für 100 m Leitung zu $L = 0,105$ dB.

Wir messen mit einem CIA Messgerät die Eingangsimpedanz der Zweidrahtleitung bei $f = 3,6$ MHz zu $Z_e = (4,7 - j 347) \Omega$. Nach /2/ und dem oben berechneten Dämpfungsfaktor berechnet sich die Impedanz direkt an der Antenne zu $Z_A = (9,1 + j 888)$ und mit dem komplexen Wellenwiderstand der Zweidrahtleitung bei $f = 3,6$ MHz /2/ $Z_o = (600 - j 0,89) \Omega$ wird der antennenseitige Reflexionsfaktor $r_2 = 0,99190$. Das antennenseitige Stehwellenverhältnis berechnet sich daraus zu $VSWR_2 = 245.82$. Nach (Gl.5) ist der Gesamt-Verlust dann $T_L = 0,902$ dB. Der zusätzliche Verlust durch stehende Wellen berechnet sich aus der Differenz zwischen Gesamtverlust und dem Verlust bei totaler Anpassung und ist $A_L = (0,902 - 0,021) \text{ dB} = 0,881$ dB.

Mit der erlaubten Leistung von $P = 750$ W und dem Gesamtverlust von $L = 0,902$ dB ist die Wirkleistung an der Antenne $P_{ant} = 609,34$ W.

Aus der Leistungsbeziehung berechnet sich der Antennenstrom $I_{ant} = \sqrt{P / R} = \sqrt{609.34 \text{ W} / 9,1 \Omega} = 8,18$ A und die Gesamtspannung an der Antennenimpedanz $U_{ges} = 7266$ V.

Mit (Gl.2) und dem antennenseitigen Stehwellenverhältnis $VSWR_2 = 245,82$ berechnet sich der maximale Effektivwert der Spannung auf der Leitung $U_{eff} = 9480$ V und liegt damit in der Nähe der Grenzbelastung für eine Zweidrahtleitung.

Da diese Leitung verlustbehaftet und das VSWR keine Konstante ist, wird die maximale Spannung auf der Leitung aus einer genaueren Rechnung zu $U_{eff} = 8944,4$ V – also etwas kleiner als die oben berechnete Spannung von $U_{eff} = 9480$ V.

Der Gesamtverlust auf der Zweidrahtleitung ist lediglich $T_L = 0.902$ dB und damit tragbar.

Die gemessene Eingangs-Impedanz $Z_e = (4,7 - j 347) \Omega$ muss mittels einer Anpassschaltung auf 50Ω transformiert werden. Wird hierzu eine einfache LC-Kombination mit einer Spulengüte von $Q_L = 100$ verwendet, ergibt sich ein Verlust in der Anpassschaltung von $L = 3,3$ dB, der Gesamtverlust der Antennenanlage somit $L_{ges} = 4,2$ dB.

Die tatsächlich Leistung an der Antenne inkl. des Anpassnetzwerkes ist also lediglich traurige $P = 285$ W und der Antennenstrom reduziert sich damit auf $I_{ant} = 5,59$ A, sowie die Spannung an der Antennenimpedanz auf $U_{eff} = 4971$ V.

Die tatsächliche Leistung von $P = 285 \text{ W}$ ist der Grundwert für die Selbsterklärung. Man sieht an diesem Beispiel wieder wie wichtig die Berechnung der Antennenanlage ist, um die elektrische Belastung der Leitung zu kennen und um die richtigen Werte der gesetzlich einzuhaltenden Sicherheitsabstände zu erhalten.

Wird eine Antennenanlage nicht berechnet, sind die Sicherheitsabstände meistens viel zu hoch und führen u.U. zu einer gesetzlich verordneten Leistungsreduzierung oder sogar zum Funkverbot.

Damit ist die Rechnung allerdings noch nicht vollständig. Zur Symmetrierung wird meistens ein Balun eingesetzt, d.h. die gemessene Eingangsimpedanz $\underline{Z}_e = (4,7 - j 347) \Omega$ ist die Lastimpedanz des Balun.

Wird ein realer Balun bspw. 1: 4 verwendet wird die Eingangsimpedanz auf $\underline{Z} = (1,24 + j 28,4) \Omega$ transformiert. Diese Impedanz ist jetzt die Lastimpedanz der Anpassschaltung und deren Verlust wird nur $L = 0,37 \text{ dB}$ – also eine wesentliche Verbesserung. Der Gesamtverlust der Antennenanlage wäre dann $L_{\text{ges}} = (0,37 + 0,902) \text{ dB} = 1,272 \text{ dB}$. Ein eben noch tragbarer Verlust.

Würde bspw. gedankenlos ein 1: 1 Balun eingesetzt werden, würden die Verluste der Anpassschaltung $L = 2,2 \text{ dB}$ betragen und die Gesamtverluste auf $L_{\text{ges}} = 3,102 \text{ dB}$ steigen. Man sieht darin wie wichtig die richtige Wahl des Balun ist - Thema der Optimierung einer KW-Antennenanlage.

Will man optimale und sichere Verhältnisse haben, sollte eine Antennenanlage immer berechnet werden bevor man in die „Luft“ geht.

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

Literatur

- /1/ „Antennen Tuning I, II, III, IV“
- /2/ „Die Antenne macht die Musik“
- /3/ „Pi – Filter mit Verlusten“
- /4/ „Passive Netzwerke zur Anpassung “
- /5/ „Theoretische Grundlagen von Endstufen“
- /6/ „Das T-Filter,, Teil I und Teil II
- /7/ „Antennenmesstechnik I bis IV“
- /8/ „Der Kondensator,,
- /9/ „Faltdipol für 160 – 10 m“
- /10/ „Die Zweidrahtleitung bei KW“
- /11/ „Skin-Effekt“
- /12/ Balune für Kurzwellen 1 - 5

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.