

**Antennen
Tuning I
Optimierung
von
Antennenanlagen
im KW-Bereich**

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

Dieser Beitrag und alle folgenden über
die Optimierung von
KW-Antennenanlagen sind meinem
langjährigen Freund
DL8OL/sk gewidmet.

Klaus war lange Jahre Mitglied im
OV H31 und vielen unter seinem
Spitznamen „Der böse Klaus“ bekannt,
obwohl er das genaue Gegenteil war.

Klaus, Hauptbrandwachtmeister der
Berufsfeuerwehr Hannover, war auch
als Botschafter für sein Handwerk
in vielen Ländern äußerst aktiv.

Auch ich trauere um einen Freund
und allseits beliebten Funkamateurliebhaber.

DL3LH, Walter

Vorwort:

Viele Stunden habe ich mit Klaus, DL8OL, über Verluste in Antennenanlagen diskutiert. Dabei wurde schon mal die eine oder andere „Gersten Kaltschale“ geleert. Nie vergessen werde ich Klaus beim Lötten und verbessern seiner KW-Station. Dabei war er so konzentriert und hat sich mit dem heißen LötKolben am Kopf gekratzt. Das Ergebnis, reichlich Brandwunden und erst die Bemerkungen seiner Kollegen auf der Wache. Damals war ich noch Student in den Anfangssemestern an der TU-Hannover und von jeglicher Ahnung weit entfernt. Jedenfalls, gemeinsam waren wir der Meinung, dass nicht nur die Antenne die wichtigste Komponente eines Sende-Empfangssystems ist – so war das uns von unseren Altvorderen immer wieder gepredigt worden, sondern auch die anderen Komponenten wie Zuleitung, Koppler, Symmetrierung usw. von gleicher, wenn nicht noch von größerer Wichtigkeit sind.

Nur das einwandfreie und perfekte Zusammenspiel aller Komponenten des Systems bringt den gewünschten Erfolg, in Form eines angemessenen Signals bei der Gegenstation. Dennoch, meistens steht nur die Antenne im Vordergrund alle Betrachtungen und Bemühungen. Wird eine neue Antenne „aufgehängt“, erwartet man gleichzeitig bessere Ergebnisse. Werden Antennen vergleichsweise betrieben, stimmt das erwartete Ergebnis selten mit der Erwartung und dem Aufwand im Einklang. Enttäuschung macht sich breit, wenn der erwartete Erfolg nicht mit der Realität übereinstimmt.

Wird tatsächlich eine Signal-Verbesserung erreicht, ist automatisch die neue Antenne besser. Die Frage: „Woher kommt eigentlich die Verbesserung“? tritt in den Hintergrund. Ist es wirklich die Antenne oder nur das bessere Zusammenspiel der Komponenten im Antennensystem?

Stellt man eine Verschlechterung fest, wird die neue Antenne in Frage gestellt. Dabei kann die neue Antenne wirklich wesentlich besser sein, doch das Zusammenspiel der Komponenten ist nicht optimal und bringt mehr Verluste. Eine Antenne ist immer eingebunden in das Übertragungssystem Sender-Empfänger und folglich nur eine Komponente des Systems. Nur allein die Antenne in den Blickpunkt alle Betrachtungen zu rücken ist also absolut falsch. Wichtiger sind Zuleitung, Koppler, Symmetrierung usw. weil hier die Verluste stecken. Jeder Funkamateurliebt nicht eine, sondern seine Antennenanlage, so dass Aussagen über die Funktionalität in aller Regel nicht auf eine andere Antennenanlage übertragen werden können. Jede Antennenanlage muss einzeln konzipiert und optimiert werden.

Ein T-Koppler kann bspw. so abgestimmt werden, dass der größte Teil der Leistung im Koppler verbleibt. Ebenso verhält es sich beim S- und Z-Match, dem Resonanzkoppler und dem Pi-Filter /2/. Eine Abstimmung auf VSWR = 1 zeigt zwar exakte Anpassung im gesamten System an, doch sagt das gute VSWR nichts über die Verluste im System aus /1/. Auch ein Dummy-Load hat ein gutes VSWR. Aus einer einfachen Überlegung ergibt sich, dass je mehr Spulen im Antennen-System verwendet werden, zwangsläufig die Verluste steigen müssen. Alle Komponenten der Antennen-Anlage müssen exakt aufeinander abgestimmt sein, will man nicht die Verbesserung einer Komponente mit der Verschlechterung der anderen Komponenten kompensieren. Es ist wie bei einem Motor. Alle Teile müssen exakt aufeinander abgestimmt sein um einen perfekten Motor zu haben. Was nutzen die besten Zündkerzen, wenn nicht Öl, Öldruck, Getriebe, Verbrennungsvorgang, Drehmoment usw. genau aufeinander abgestimmt sind. Das Gleiche gilt auch für ein Antennensystem. Doch immer wird nur an der Antenne laboriert, ohne den Einfluss auf die anderen Komponenten zu bedenken. Für besonders Ungläubige hatte der legendäre Funkamateurliebt Günter Schwarzbeck†, DL1BU, immer eine Tube Antennullin im Angebot.

1. Die Wichtigkeit der Antennen - Impedanz

Wie in /1/ ausführlich beschrieben, ist die Impedanz der Antenne die alles bestimmende Größe. Sie bestimmt die Leistung, die von der Antenne abstrahlt wird, auch die Verluste auf der Zuleitung, die Belastbarkeit der Zuleitung, welches Koppelsystem zur Anwendung kommen darf, die Verluste im Koppler, die Verluste in der Symmetrierung, die Dimensionierung der Einzelelemente im Koppelsystem und deren Strom – und Spannungsfestigkeit, also die Ausführung des gesamten Antennensystems. Daher ist die Kenntnis der Antennenfußpunktimpedanz von eminenter Bedeutung und muss bekannt sein. Entweder durch Messung /2/ oder durch Rechnung.

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

$$\Gamma_2 = (Z_A - Z_0) / (Z_A + Z_0). \quad (\text{Gl.1.0})$$

Nach /1/ bestimmt sich daraus der Gesamt-Verlust auf der Antennenzuleitung zu

$$T_L = [(a^2 - |\underline{r}_2|^2) / a (1 - |\underline{r}_2|^2)] \quad (\text{Gl.1.1})$$

und da der Verlust meist in dB angegeben wird

$$T_L = 10 \log [(a^2 - |\underline{r}_2|^2) / a (1 - |\underline{r}_2|^2)] \quad (\text{Gl.1.2})$$

Wird in (Gl.1.1) 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-Ratio“. Mit (Gl.1.2) wird für $\underline{r}_2 = 0$ und $M_L = 10 \log a$ und durch Umkehrung der logarithmischen Funktion $a = 10^{ML/10}$. Ist also der „Matched-Line-Loss“ gegeben, so errechnet sich daraus der lineare Faktor zu

$$a = 10^{ML/10} \quad (\text{Gl.1.3})$$

Der so definierte Dämpfungsfaktor a ist größer als 1. Die Dämpfungswerte für vollständige Anpassung können Tabellen der Hersteller entnommen werden und sind in dB pro 100 m und für eine bestimmte Frequenz angegeben.

Der Gesamtverlust auf einer Leitung nach (Gl.1.1/1.2) ist also abhängig vom Dämpfungsfaktor a der Leitung und vom Betragsquadrat des antennenseitigen Reflexionsfaktors \underline{r}_2 . Ursache für die Zusatzverluste sind stehende Wellen auf der Leitung und die damit verbundenen höheren Ströme und Spannungen. Der äußerst seltene Fall eines Stehwellenverhältnisses von $S = 1$ (keine stehenden Wellen) ist nur bei totaler Anpassung der Antennenimpedanz $\underline{Z}_A = R_A \pm j X_A$ an den komplexen Wellenwiderstand der Leitung möglich und praktisch nie vorhanden.

Die Gesamtdämpfung nach (Gl.1.2) wird für $a = 1$ (verlustlos) unabhängig vom antennenseitigen Reflexionsfaktor, d.h. je verlustärmer eine Leitung ist, desto geringer sind auch die Verluste durch stehende Wellen und der Einfluss des Reflexionsfaktors wird immer geringer. Es sollen also möglichst verlustarme Leitungen - wie Doppelleitungen - verwendet werden. Koaxkabel sind - bis auf wenige Ausnahmen - für Mehrbandbetrieb ungeeignet.

Da jede Antenne eine andere Impedanz hat, stellen sich auf der Antennenzuleitung auch immer andere Verlustsituationen ein, die einen direkten Vergleich unmöglich machen. Nur Antennen die die gleiche Wirkleistung umsetzen sind vergleichbar.

Beispiel 1.1

Eine Antenne im 80 m Band wird über ein Aircell7 Kabel der Länge 150 m gespeist. Die Verluste des Kabels bei totaler Anpassung können für diese Frequenz der Tabelle des Herstellers zu 2 dB/100 m entnommen werden. Da die Länge des Kabels 150 m ist wird der Dämpfungswert des Kabels 3 dB für diese 150 m. Daraus berechnet sich der Dämpfungsfaktor a nach (Gl.1.3) zu

$$a = 10^{0,3} = 2.$$

Die Messung der Antennenimpedanz ergab für die Frequenz $f = 3,6$ MHz den Wert $\underline{Z} = (100 - j 200) \Omega$. Das verwendete Aircell7 Kabel hat einen Wellenwiderstand von $Z = 50 \Omega$ und eine Kapazität von $C = 74$ pF/100 m geometrischer Länge bzw. eine Gesamtkapazität von $C = 111$ pF für das 150 lange Kabel.

Nehmen wir in erster Näherung den Wellenwiderstand als reell an, so ergibt sich nach (Gl.1.0) der Betrag des antennenseitigen Reflexionsfaktors zu

$$\underline{r}_2 = |(1 - j 4) / (3 - j 4)| = 0,824621$$

$$\text{bzw. das Betragsquadrat } r_2^2 = 0,68$$

und daraus die Gesamtverluste nach (Gl.1.2)

$$T_L = 10 \log (5,1875) = 7,15 \text{ dB.}$$

Die Zusatzverluste durch das erhöhte VSWR belaufen sich auf (Additional-Loss)

$$A_L = 7,15 \text{ dB} - 3 \text{ dB} = 4,15 \text{ dB}.$$

Das VSWR oben an der Antenne berechnet sich aus dem antennenseitigen Reflexionsfaktor zu $S_2 = 10,4$ und am Leitungseingang wird $S_1 = 2,4 / 1/$. Die Dämpfung der Leitung verbessert das VSWR zum Leitungsanfang hin.

Bei einem Dämpfungswert von 7,15 dB werden rund 80 % der Leistung nur auf der Leitung in Wärme gewandelt. Von 500 W Eingangsleistung am Eingang der Leitung kommen gerade noch 96 W an der Antenne an. Ein weiterer Nachteil des höheren VSWR ist die Reduzierung der übertragbaren Leistung über das Kabel. Bei der Frequenz $f = 3,6 \text{ MHz}$ ist die übertragbare Leistung des Kabels nach Herstellerangaben $P = 2900 \text{ W}$. Durch das erhöhte VSWR verringert sich die übertragbare Leistung des Kabels auf gerade mal $P = 278 \text{ W}$. Da nur Kurzzeitbetrieb gemacht wird, fallen die gelegentlichen Überschläge sicherlich nicht auf.

Beispiel 1.2

Der Amateur bekommt mit der Antennenanlage nach Beispiel 1.1 immer schlechte Rapporte, gemessen an der verwendeten Eingangsleistung von 500 W. Es muss an der Antenne liegen, eine neue Antenne muss her. Mit viel Aufwand wird eine Delta-Loop in 15 m Höhe aufgehängt. Die Impedanz wird in luftiger Höhe gemessen und ist $\underline{Z} = (150 - j 60) \Omega$. Wir berechnen mit der neuen Impedanz das Betragsquadrat des Reflexionsfaktors nach (Gl.1.0) zu $r_2^2 = 0,3392$ und die Gesamtverluste nach (Gl.1.2) sind $T_L = 10 \log(2,68) = 4,28 \text{ dB}$.

Von der Eingangsleistung 500 W kommen jetzt immerhin 186 W an der Antenne an. Wir haben also einen Leistungsgewinn von 90 W. Mit Überraschung nimmt der OM die neuen Rapporte entgegen und wundert sich über das magere Ergebnis. Tagelang werden Versuche gestartet und zwischen beiden Antennen hin und her geschaltet. Das Ergebnis bleibt traurig. Jetzt bleibt eigentlich nur QRO auf 1000 Watt. Die Leistung an der Antenne erhöht sich auf 372 W. Dafür stellen sich Probleme beim Koaxkabel ein. Es wird beim Test warm und es erfolgt ein Durchschlag, der das Kabel unbrauchbar macht. Das Kabel wird durch ein neues ersetzt und kurzer Zeit stellt sich der gleiche Zustand ein. Die Leistungstabelle für das Arcell7 Kabel sagt aus, das das Kabel für 2,9 KW Leistung ausgelegt ist, daran kann es nicht liegen. Die Unsicherheit bleibt – woran es liegen kann.

Was ist genau passiert?

Werden beide Antennen genauer betrachtet stellt sich heraus, dass die Antenne 1 die bessere ist und einen höheren Antennengewinn hat. Die aufwändige Schleife kann den gewünschten Erfolg nicht bringen, weil sich die Impedanzverhältnisse der Antenne geändert haben und die falsche Zuleitung der Grund für den Misserfolg ist. Durch das erhöhte VSWR reduziert sich außerdem die übertragbare Leistung über das Kabel. Die Veränderung in der Antennenanlage war nicht überlegt und konnte so nicht die gewünschte Signalverbesserung bringen.

An diesen beiden Beispielen wird ersichtlich, dass alle Komponenten einer Antennenanlage aufeinander abgestimmt werden müssen, will man hohe Verluste meiden.

2. Die Wichtigkeit der Zuleitung

Aus den Beispielen ist die enorme Bedeutung der Eigenschaften der Zuleitung ersichtlich. Der komplexe Wellenwiderstand und die Antennenimpedanz bestimmen den komplexen Reflexionsfaktor am Fußpunkt der Antenne. Dieser und der Dämpfungswert α bestimmen die Zusatzverluste durch stehende Wellen. Aus dem Reflexionsfaktor berechnen sich dann das Stehwellenverhältnis und die maximal übertragbare Leistung auf der Leitung.

Die Antennenzuleitung hat aber noch eine weitere Eigenschaft, sie transformiert nach einer komplexen Funktion die Antennenimpedanz an den Eingang der Leitung. Hier stellt sich je nach Länge der Leitung und Betriebsfrequenz, Dämpfung und Wellenwiderstand eine ebenfalls komplexe Eingangsimpedanz mit induktivem oder kapazitivem Anteil ein. Diese Eingangsimpedanz ist zugleich die Lastimpedanz der Anpassschaltung zwischen Leitung und Senderausgang und bestimmt die Verluste im Anpassnetzwerk. Ein Anpassnetzwerk ist immer erforderlich, will man maximalen Leistungsfluss in der gesamten Antennenanlage gewährleisten/11/. Es ist also nicht egal welche Leitung, welcher Wellenwiderstand, welche Länge mit welcher Dämpfung zur Anwendung kommen.

Hier muss sorgfältig geplant werden, denn die Länge der Zuleitung bestimmt – wie oben beschrieben – auch die Verluste auf der Zuleitung. Wir haben also ein komplexes Zusammenspiel diverser Komponenten zu beachten.

2.1 Die Bedeutung des Wellenwiderstandes

Der Wellenwiderstand einer Leitung ist eine wichtige Kenngröße einer Leitung, die sich aus der Geometrie berechnen lässt. Nach [1] ist der Wellenwiderstand eines beliebigen Kabels

$$Z_0 = R_0 - j X_0 \tag{Gl.2.1}$$

und komplex mit kapazitivem Anteil. Der imaginäre Anteil X_0 berechnet sich zu

$$X_0 = R_0 (\alpha / \beta) \tag{Gl.2.2}$$

wobei α die Dämpfungskonstante in Neper pro Längeneinheit und β die Phasenkonstante

$$\beta = 2 \pi / \lambda \tag{Gl.2.3}$$

ist. Da die Phasenkonstante β frequenzabhängig ist, gilt es damit auch für X_0 .

Der Zusammenhang zwischen dem in (Gl.1.3) definierten Dämpfungsfaktor a und der Dämpfungskonstanten α der Leitung ist

$$a = e^{2\alpha l} \tag{Gl.2.4}$$

mit l als Länge der Leitung. Je nach Anforderung ergeben sich für jeden Leitungstyp optimale Abmessungen, die in Tab. 2.1 aufgelistet sind.

	Koaxkabel		Doppelleitung	
	D/d	$Z_L \sqrt{\epsilon_r} / \Omega$	D/d	$Z_L \sqrt{\epsilon_r} / \Omega$
kleinste Dämpfung	3.60	77	2.276	175.6
größte Spannungsfestigkeit	2.72	60	2.932	208.6
größte Leistung	1.65	30	2.146	167.7
Kompromiss Wert			2.420	185.0

Tab. 2.1: Optimale Abmessungen und Wellenwiderstände einiger Leitungstypen bei Luftisolation

D/d ist beim Koaxkabel das Verhältnis von Außen- zu Innendurchmesser unterhalb der Abschirmung und bei der Doppelleitung das Verhältnis von mittlerem Abstand D zu Drahtdurchmesser d (Bild 1). Beispielsweise hat die Doppelleitung nach Tab. 1 bei einem Verhältnis D/d = 2,276 die kleinste Dämpfung, bei einem Verhältnis von D/d = 2,932 die größte Spannungsfestigkeit und bei D/d = 2,146 ist die größte Leistungsübertragung möglich. Wird bei der Planung einer Antennenanlage mit Doppelleitung ein Wellenwiderstand von $Z_0 = 185 \Omega$ erreicht, ist genau der Kompromisswert eingehalten.

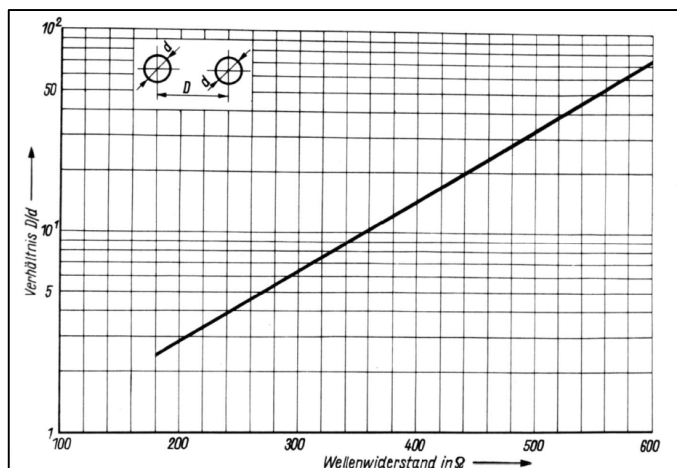


Bild 2.1: Wellenwiderstand einer Doppelleitung für Luftisolation $\epsilon_r = 1$

Wie Bild 2.1 entnommen werden kann, ist ein Wellenwiderstand von $Z_0 = 185 \Omega$ realisierbar, wenn der Abstand der beiden Leiter sehr klein wird. Der Abstand D ist dabei 5,7 mm bei einem Innendurchmesser von 2 mm. Lautsprecherleitungen haben Wellenwiderstände in dieser Größenordnung, man kann sich auch mit „gestrippten“ Koaxkabel behelfen. RG-58 ohne Abschirmung hat dicht bei dicht angeordnet einen Wellenwiderstand $Z_0 = 187 \Omega$. Die Spannungsfestigkeit ist $U_{\max} = 950 \text{ V}$.

Ohne große Zunahme an Dämpfung können auch Wellenwiderstände von $Z_0 = 500$ bis 600Ω verwendet werden, weil bei der technischen Realisierung die bekannten „Tomaten-Spreizer“ Anwendung finden können /2/. Die Zweidrahtleitung wird einfach in die vorhandenen Stege eingeklippt. Der Abstand bei den Tomaten-Spreizern ist $D = 84 \text{ mm}$ und bei einem Drahtdurchmesser von $d = 1.5 \text{ mm}$ ergibt sich daraus ein Wellenwiderstand von $Z_0 = 564 \Omega$. Die Spannung auf der Leitung ist $U_{\max} = 12000 \text{ V}$ und darf nicht überschritten werden /1/. Der Verkürzungsfaktor ist $v = 0.92$.

Die Dämpfungswerte dieser Doppelleitung können Tab. 2 entnommen werden.

Frequenz MHz	Dämpfungswert dB pro 100 m	Wellenwiderstand $\underline{Z} = R_o - j X_o$
1.90	0.074	564 - j 1.17
3.60	0.105	564 - j 0.89
7.05	0.153	564 - j 0.66
14.2	0.227	564 - j 0.48
21.2	0.284	564 - j 0.41
29.0	0.339	564 - j 0.35

Tab. 2.2: Dämpfungswerte und komplexer Wellenwiderstand der 564Ω Zweidrahtleitung mit „Tomaten-Spreizern“

Aus Antennenimpedanz und komplexen Wellenwiderstand ergibt sich nach (Gl.1) der antennenseitige Reflexionsfaktor und mit dem Dämpfungswert a nach (Gl.1.3) und der Länge der Antennenzuleitung die Gesamtverluste nach (Gl.1.2). Die Leitungslänge bestimmt auch die Eingangsimpedanz der Leitung und die Verluste der Anpassschaltung.

Beispiel 2.1

Berechne für die Frequenz $f = 3,6 \text{ MHz}$ den Dämpfungsfaktor a und die Verluste der Zweidrahtleitung mit „Tomaten-Spreizern“ einer Länge von $l = 25 \text{ m}$. Die gemessene Antennenimpedanz ist $\underline{Z} = (100 - j 200) \Omega$.

Der Dämpfungswert wird fast immer für eine Länge von 100 m angegeben. Für die Länge von 25 m ist dieser Wert dann nur $\frac{1}{4}$ davon. Der logarithmische Dämpfungswert ist also $M_L = \frac{1}{4} 0,105 \text{ dB} / 25\text{m} = 0,0375 \text{ dB}$ für 25 m. Daraus berechnet sich der lineare Dämpfungsfaktor nach (Gl.1.3) zu $a = 10^{0,00375} = 1,008672081$.

Wir berechnen mit (Gl.1.2) die Dämpfung der Leitung zu $T_L = 0,096 \text{ dB}$. Der Betrag des antennenseitigen Reflexionsfaktors berechnet sich nach (Gl.1.0) zu $r = 0,7389$ und daraus das VSWR oben an der Antenne zu $S_1 = 6,66$ und das VSWR unten am Eingang der Leitung $S_2 = 6,53$.

Bei 1000 W Leistung am Eingang der Leitung berechnet sich eine maximale Spannung auf der Leitung /1/ von $U_{\max} = 1979 \text{ V}$, die im Abstand von 23,30 m vom Fußpunkt der Antenne auftritt – also 1,7 m vom Einspeisepunkt! Da die maximale Spannung von 12000 V auf der Leitung nicht überschritten wird, ist ein sicherer Betrieb möglich.

Will man die Rechenwerte aus Beispiel 1.1/1.2 mit denen aus Beispiel 2.1 vergleichen, müssen wir ein Aircell 7- Koaxkabel der Länge 25 m und sonst gleichen Werten berechnen. Die Dämpfungswerte sind für 25 m Aircell7 $T_L = 1,431 \text{ dB}$. Das VSWR an der Antenne bleibt $S_1 = 10,4$, das VSWR unten am Eingang der Leitung ist jetzt $S_2 = 7,59$.

Vergleicht man jetzt die Dämpfungswerte, kann sofort der Vorteil der Doppelleitung erkannt werden. Die Gesamtverluste auf der Doppelleitung sind nur $T_L = 0,096 \text{ dB}$ und trotz eines $\text{VSWR} = 6,66$ sehr gering.

Wir folgern:

Koaxkabel - egal welcher Ausführung – sind bis auf wenige Ausnahmen (Betrieb nur auf einer einzigen Frequenz und ein sehr kleines VSWR auf der Leitung) – für Amateurfunkzwecke im KW - Bereich absolut ungeeignet.

Wurde die Dämpfung der Leitung berechnet oder messtechnisch ermittelt /2/, muss jetzt folgerichtig die Frage nach den Verlusten in der Anpassschaltung beantwortet werden. Diese werden maßgeblich durch die Eingangsimpedanz (Lastimpedanz des APN) der Leitung bestimmt.

3. Die Wichtigkeit des Anpassnetzwerkes

Ein Anpassnetzwerk zwischen Sender und Antennenanlage ist immer erforderlich, um Anpassungsverluste im gesamten Antennensystem zu vermeiden /13/. Dazu muss das VSWR zwischen Sender und Anpassnetzwerk immer $S = 1$ sein. Untersucht man das Verlustverhalten verschiedener Anpassnetzwerke /5/, so ergeben sich eindeutige Kriterien für minimale Verluste /3, 4/. Nicht nur eine hohe Leerlaufgüte der Blindelemente, sondern auch die Lastimpedanz ist von entscheidender Bedeutung für die Verluste. Man kann zeigen, dass ein LC-Netzwerk grundsätzlich die geringeren Verluste aller möglichen Netzwerke hat und dazu noch eindeutig in der Abstimmung ist. Dennoch können die Verluste auch eines LC-Netzwerkes enorm hoch sein, wenn das Netzwerk mit einer ungünstigen Last abgeschlossen ist.

Aus einer einfachen Überlegung heraus kann sofort übersehen werden, dass kapazitive Lasten zu höheren Verlusten führen müssen als induktive, weil Induktivitäten zur Kompensation notwendig werden.

Die Leerlaufgüte von Spulen in Anpassnetzwerken ist auf etwa $Q = 300$ begrenzt /7/, während Kapazitäten hohe Güten haben und daher deren Verluste wesentlich geringer sind. Die Verluste von Kapazitäten sind vom Quadrat der anliegenden Spannung abhängig und nicht vom Strom, wie bei den Induktivitäten. Daher führen hochohmige Impedanzen mit kleinen Strömen immer zu kleineren Verlusten.

Die Eingangsimpedanz einer Leitung kann gemessen werden. Dazu eignen sich Amateurmessgeräte wie CIA, MFJ o.ä. ohne die der Antennenbau reines Roulette-Spiel wird. Da die Antennenimpedanz bekannt sein muss, kann die Eingangsimpedanz einer Leitung mit ausreichender Genauigkeit auch mittels Smith-Diagramm ermittelt werden /2, Teil III/. Durch die richtige Länge der Zuleitung kann immer erreicht werden, dass die Eingangsimpedanzen in einem Bereich liegen in denen die Verluste des Anpassnetzwerkes niedrig sind /5/. Da je nach örtlicher Geometrie die ungefähre Länge der Antennenzuleitung vorgegeben ist, kann eine Verlängerung um einige 10 Zentimeter schon die Eingangsimpedanzen in den gewünschten induktiven Bereich bringen. Bei hochohmigen Eingangsimpedanzen (rechter Teil im Smith-Diagramm) sind wegen der geringeren Ströme die Verluste geringer. Hier führt auch ein kapazitiver Anteil zu erträglichen Verlusten /5/.

Wichtig ist ein kleines VSWR auf der Antennenzuleitung, da die übertragbare Leistung genau um den Faktor des VSWR reduziert wird /1/. Bei einem hohen VSWR transformiert die Leitung zu Impedanzen mit kleinem Realteil und damit zu hohen Verlusten - siehe Tabellen in /1 und 5/. Bei gegebener Antennenimpedanz kann das VSWR nur durch Wahl des Wellenwiderstandes beeinflusst werden (Abschnitt 2.1). Da die Bedingung der induktiven Eingangsimpedanz für alle Amateurbänder gelten soll, ist etwas Zeichenarbeit im Smith-Chart oder wem es angenehmer ist auch Rechenarbeit erforderlich. Die Gleichung für den komplexen Eingangswiderstand kann der Literatur entnommen werden und ist auch in /1/ angegeben. Zur Berechnung hilft eine Excel-Tabelle. Leider geht es nicht ohne diese kleinen Mühen, die sich aber lohnen und oftmals eine Endstufe sparen.

Beispiel 3.1

Für die 25 m lange Doppelleitung aus dem Beispiel 2.1 berechnet sich bei $f = 3,6$ MHz die Eingangsimpedanz zu $Z_e = (2032 - j 1917) \Omega$ und liegt damit im hochohmigen, kapazitiven Bereich. Mit ein wenig Rechnung oder den Tabellen in /5/ werden die Verluste im LC-Anpassnetzwerk zu $L = 0,45$ dB ermittelt, so dass sich die Gesamtverluste zu $L_{ges} = (0,096 + 0,45) \text{ dB} = 0,546 \text{ dB}$ ergeben. Wir haben eine relativ verlustarme Antennenanordnung, denn mit 0,546 dB erreichen bei 1000 W Eingangsleistung immerhin noch 881,86 W die Antenne und nur 118,14 W werden im System in Wärme gewandelt. Mit einem Antennenwirkungsgrad von $\eta = 90 \%$ gelangen immerhin 793 W zur Abstrahlung.

Die Strahlungsleistung ist mit einem Antennengewinn von 6 dB immerhin $P = 3172 \text{ W}$, entsprechend 3,1 KW!

Um die Abhängigkeit der Verluste von der Länge der Antennenzuleitung zu zeigen, sei Tab. 3.1 hilfreich. Für die Berechnung sind Güten zu $Q_L = 100$, $Q_c = 500$ angenommen.

Länge der Zuleitung nach Beispiel 3.1	Impedanz am Eingang der Leitung Ω	Gesamtverlust dB
5	91 + j 47	0.10
10	116 + j 311	0.31
15	229 + j 713	0.47
20	1045 + j 1657	0.55
25	2032 - j 1917	0.54
30	306 - j 881	0.47
35	133 - j 396	0.35
40	96 - j 112	0.24
45	97 + j 130	0.31

Tab. 3.1: Verluste und Eingangsimpedanzen der Leitung nach Beispiel 3.1 als Funktion der Leitungslänge

Würde man beispielsweise die Antennenzuleitung von 20 m auf 45 m verlängern, hätten wir trotz der längeren Zuleitung Gesamtverluste von nur $L_{ges} = 0,31$ dB. Bei kleinen Leistungen fällt (nur in diesem Beispiel) der Zugewinn allerdings wenig ins Gewicht.

Beispiel 3.2

Ein weiteres typisches Beispiel ist ein Dipol verschiedener Längen an einer immer gleichen 600Ω Zuleitung der Länge $l = 20$ m bei der Frequenz $f = 3,6$ MHz.

Länge des Dipols m	Gewinn dBi	Gesamtverlust mit LC-Filter dB	Gesamtverlust mit Pi-Filter in dB $C_{ant} = 1000$ pF
2 x 10	6.45	5.36	13.04
2 x 20	7.61	0.92	6.46
2 x 27	8.21	0.41	3.19
2 x 30	8.47	0.63	2.02
2 x 40	9.40	0.42	0.60
2 x 50	10.2	1.04	3.81
2 x 100	7.67	0.87	5.27

Tab. 3.2: Gesamtverluste einer Antennenanlage mit Dipolen verschiedener Länge und jeweils gleicher 600Ω Antennenzuleitung für die Frequenz $f = 3,6$ MHz

Würde man die Antennen vergleichen wollen ohne die Zuleitung zu verändern, würde sich ein völlig verkehrtes Bild von einer Antenne mit 2 x 27 m und einer Antenne mit 2 x 50 m geben, obwohl die längere Antenne einen weitaus höheren Antennengewinn von $G_i = 10,2$ dB hat. Der Antennengewinn wird durch die falsche Dimensionierung der anderen Komponenten zu Nichte gemacht.

4. Die Wichtigkeit der Symmetrierung durch einen HF-Transformator (Balun)

Die symmetrische Doppelleitung ist mit der unsymmetrischen LC-Anpassschaltung zu koppeln. Deshalb muss am Ausgang des LC-Netzwerkes eine Wandlung von unsymmetrisch auf symmetrisch erfolgen. Damit werden Gleichtakt-Ausgleichströme vermieden, die zu weiteren Verlusten und vagabundierender HF führen /1/. Dies kann in einfacher Weise durch einen Luft-Balun erreicht werden /1/. Symmetrische Anpassnetzwerke sind weder notwendig noch HF- technisch sinnvoll.

Für die Dimensionierung sei auf /7, 8/ verwiesen. Der Luft-Balun wird aus verwirbelten Kupferdraht 2 bis 3 mm, mit einem Durchmesser von 40 mm, Länge 30 mm und 10 Windungen gefertigt, so dass die primäre Induktivität des Balun etwa 2 bis 4 μH beträgt. Besonders verlustarm der Phasenumkehrtransformator /14/.

Der Wert der primären Induktivität bestimmt die untere Grenzfrequenz des Balun. Das Bild eines Luft-Balun ist in /8/ zu sehen. Die Einfügedämpfung ist je nach Qualität der Verdrillung (Koppelfaktor /1/) $L = 0,2$ bis $0,4$ dB und geht mit in die Verlustberechnung der Gesamtanlage ein, die wichtig ist für die Leistung oben an der Antenne und die Selbsterklärung mit ihren Sicherheitsabständen nach BEMFV /2/.

Eine Antennenanlage muss berechnet oder messtechnisch erfasst werden, da sonst die Sicherheitsabstände zu groß werden und evtl. eine Leistungsreduzierung seitens der Behörden unumgänglich ist. Das „Watt“ Programm liefert zu große Sicherheitsabstände, weil es die Zusatzverluste auf der Zuleitung nicht berücksichtigt.

5. Planung und Ausführung einer optimalen Antennenanlage für KW

Eine optimale Antennenanlage ist sorgfältig zu planen und kann in Schritten ausgeführt werden:

1. Art der Antenne festlegen. Die örtliche Geometrie ist entscheidend.
2. Die Fußpunktimpedanz der Antenne bei den in Frage kommenden Frequenzen bestimmen.
Entweder durch Messung am Eingang einer Zuleitung bekannter Länge oder Rechnung. Ein ungefährer Wert reicht völlig aus /2/.
3. Festlegung der Art der Zuleitung und des Wellenwiderstandes damit das VSWR auf der Leitung möglichst klein ist.
4. Festlegen der Länge der Zuleitung damit die Eingangsimpedanz möglichst im induktiven Bereich bleibt /2/ oder hochohmig ist.
5. Messung der Dämpfung der Leitung durch die Return-Loss Methode oder durch Messung des VSWR für den Kurzschlussfall /2/.
6. Wickeln eines Luft - Balun – siehe oben
7. Festlegen der Art der Anpassschaltung – möglichst LC /3, 4/
8. Messung der Eingangsimpedanz der Zuleitung bei den benutzen Frequenzen
9. Messung mit kleiner Leistung Ausgangsspannung hinter dem Balun und Bestimmung der Verluste. Das VSWR am Eingang der Anpassschaltung sollte $S = 1$ sein.
10. Berechnung der Leistung oben an der Antenne aus den Dämpfungswerten der Anpassschaltung nebst Balun und dem Dämpfungswert der Zuleitung nach Punkt 5.
11. Berechnung der Strahlungsleistung mit geschätztem (Wiesbeck) oder berechnetem Antennengewinn.

6. Zusammenfassung

Eine Antennenanlage - auch für Amateurzwecke - muss sorgfältig geplant und berechnet werden, will man gute Ergebnisse erzielen. Sicherlich, die Antenne ist immer noch der beste Hochfrequenzverstärker, doch muss erst einmal die HF an die Antenne gelangen können, um durch den Antennengewinn verstärkt zu werden. Die Antennenimpedanz ist die entscheidende Größe um eine Antennenanlage optimal dimensionieren zu können. Sie muss durch Messung oder Rechnung bekannt sein. Die Antennenimpedanz, die Art der Zuleitung und die Leitungslänge bestimmen dann welche Art von Koppler verwendet werden kann. Die Wahl des Wellenwiderstandes, die Länge der Zuleitung und die Art der Anpassschaltung bestimmen die Verluste im gesamten Antennensystem.

Irgendeinen „Strick“ aufzuhängen, mit einer beliebigen Zuleitung zu verbinden und dann mittels irgendeines Kopplers in Resonanz zu quälen, rechtfertigt nicht den hohen Anspruch eines geprüften Funkamateurs (Siehe auch Prüfungsstoff für die Amateurfunkprüfung von meinem Jugendfreund Eckard Moltrecht, DJ4UF).

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

Literatur

- /1/ „Die Antenne macht die Musik“, DL3LH,
- /2/ „Antennenmesstechnik I - VI“, DL3LH,
- /3/ „Das Pi-Filter mit Verlusten, I, II“, DL3LH
- /4/ „Das T-Filter mit Verlusten“, DL3LH,
- /5/ „Passive Netzwerke zur Anpassung“, DL3LH,
- /6/ „Der Kondensator das unbekannte Wesen“, DL3LH,
- /7/ „Die Induktivität in der Praxis“, DL3LH,
- /8/ „Mythos Balun I, II“, DL3LH,
- /9/ „Ströme, Spannungen und Verluste in Anpassschaltungen“, DL3LH
- /10/ „Mythos Resonante Antenne“, DL3LH,
- /11/ „Anpassung, Wirkungsgrad und Co“, DL3LH,
- /12/ „Die T-Antenne“, DL3LH
- /13/ „Warum eine Anpassschaltung bei KW erforderlich ist“, DL3LH
- /14/ „Der Phasenumkehrtransformator als Balun Teil1 – Teil 3“, 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.