

**Grundsätzliche
Überlegungen bei der
Planung und Optimierung
einer
KW - Antennenanlage**

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

Vorwort:

Jeder Amateur sollte an einer optimalen Antennenanlage interessiert sein. Optimal bezieht sich dabei auf möglichst geringe Verluste für das Sende- und Empfangssignal. Da uns als Funkamateure zugestanden wird, selbst eine Erklärung zu erstellen, bevor HF die Antenne verlässt, ist die vorausschauende Planung der KW – Antennenanlage von eminenter Bedeutung.

Die Grundlagen und Überlegungen für eine optimale Antennenanlage können den Beiträgen auf der Seite von www.heide-holst.de entnommen werden. Dazu ist es notwendig alle Beiträge zu lesen, was mit erheblichem Aufwand verbunden ist und manchen davon abhält seine Antennenanlage optimal zu gestalten.

Ich möchte deshalb mit diesem Beitrag die grundsätzlichen Überlegungen zur Optimierung einer KW-Antennenanlage zusammenfassen, damit jeder Amateur seine Antennenanlage optimal gestalten kann - ohne alle Beiträge gelesen zu haben. Treten Fragen auf, kann der spezielle Beitrag zu Rate gezogen werden.

Grundsätzlich besteht die Antennenanlage aus Antenne, Zuleitung und Koppelsystem. Diese Selbstverständlichkeit wird oft übersehen, denn nur das richtige Zusammenspiel aller Komponenten bringt den gewünschten Erfolg in Form geringster Verluste für das hochfrequente Signal auf dem Weg vom Senderausgang zur Antenne. Jede Komponente für sich allein zu betrachten ist also schon mal falsch, wie mancher feststellen musste, der von einem mit Lob überhäuftten „guten“ Tuner/Antennenkoppler enttäuscht wurde.

1. Die Platzverhältnisse

Die Grundsatz-Planung einer KW–Antennenanlage für die langwelligen Bänder beginnt mit den vorgegebenen Platzverhältnissen und der Frage:

- a. Welche Drahtlänge kann ich unterbringen?
- b. Welche Höhe hat meine Antenne?
- c. An welcher Stelle kann ich die hochfrequente Leistung einspeisen?

Alle 3 Fragen zusammen entscheiden über die Art und Ausführung der Antenne und damit über die Fußpunktimpedanz, die **alle weiteren Überlegungen** bestimmt. Dabei sollte man sich sofort von dem Gedanken lösen, dass eine Antenne in Resonanz betrieben werden muss. Das ist nicht erforderlich (manchmal sogar hinderlich) - da wir für den KW-Bereich immer einen Antennen-Tuner benötigen.

Die frequenzabhängige Antennenimpedanz nach Real- und Imaginärteil kann mit einem Antennenprogramm berechnet oder durch Messung direkt an der Antenne bestimmt werden. In luftiger Höhe zu messen ist reichlich umständlich und praxisfern. Besser ist die Messung der Eingangsimpedanz am unteren Ende der Antennen-Zuleitung, aus der alle wichtigen Daten berechnet oder mit dem Smith-Chart ermittelt werden können. Die Resonanz am Eingang einer Zuleitung ist nicht identisch mit der natürlichen Resonanz der Antenne.

Grundlegend hat eine Antenne folgendes Impedanzverhalten: Ist die Antenne im Speisepunkt niederohmig, dann liegt eine Serienresonanz vor. Wird diese Antenne unterhalb ihrer natürlichen Resonanz betrieben, so ist der Imaginärteil kapazitiv, oberhalb induktiv. Ist die Antenne im Speisepunkt hochohmig kehrt sich der Impedanzverlauf um. Kurze Antennen, weit unterhalb ihrer Eigenresonanz betrieben, sind sehr niederohmig mit einem hohen kapazitiven Imaginärteil.

2. Die Antenne

Die Antenne ist unbestritten die wichtigste Komponente der Antennenanlage, denn ohne Antenne wird kein hochfrequentes Signal in den freien Raum abgestrahlt. Für die Abstrahlung sind die Bodenverhältnisse am Standort entscheidend, während die Impedanz der Antenne stark von der Höhe, aber nur wenig von den Bodenverhältnissen abhängig ist.

Für den Antennendraht kommt nur Kupfer-, Alu oder Bronze in Frage. Andere Materialien scheiden wegen der höheren Verluste und des damit verbundenen schlechten Antennen-Wirkungsgrades aus.

Der Drahtdurchmesser muss wegen des Skin-Effektes möglichst groß gewählt werden, wird aber begrenzt durch den gewichtsabhängigen Durchhang, der wiederum von der Länge der Antenne abhängig ist. Der Skin-Effekt hat zu Folge, dass der Antennenstrom nicht gleichmäßig über den ganzen Leiterquerschnitt verteilt ist, sondern nur in einer kleinen Schicht unterhalb der Oberfläche fließt.

Aluminium (legierter Schweißdraht aus Automaten) ist wegen des geringeren Gewichtes ideal für den KW-Antennenbau und hat elektrisch fast die gleichen Eigenschaften wie Kupfer. Beim Übergang von Alu auf Kupfer entsteht eine Differenz-Spannung und damit ein Strom, der zu Korrosion, verbunden mit hohen Verlusten, führt. Dem Übergang Kupfer – Alu ist daher besondere Aufmerksamkeit zu schenken.

Welche Art von Antenne letztendlich zum Einsatz kommt wird durch die vorhandenen Örtlichkeiten bestimmt. Der einfache Dipol in seinen vielen Formen ist die Antenne Nr. 1 und einer Schleife ebenbürtig.

3. Die Antennenzuleitung

3.1 Die Impedanz der Zuleitung

Die Antenne wird über die Zuleitung mit hochfrequenter Energie versorgt. Als Zuleitung sollte eine symmetrische Doppelleitung, eine Reusenleitung oder eine Sommerfeld-Leitung verwendet werden. Die gebräuchlichste Art ist die Zweidrahtleitung, auch als Hühnerleiter bezeichnet.

Koaxkabel - egal welcher Art - scheidet wegen der hohen Verluste von vornherein aus. Nur in ganz wenigen Fällen in denen die Impedanz der Antenne reell und in der unmittelbaren Nähe der Impedanz des Koaxkabel liegt, kann Koaxkabel verwendet werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Koaxkabel unsymmetrisch ist, die meisten Antennen aber eine symmetrische Anordnung gegenüber Erde darstellen.

Die Verluste einer beliebigen Antennenzuleitung setzen sich aus den Verlusten bei:

- a. Anpassung und
- b. den Zusatzverlusten durch stehende Wellen zusammen.

Nur die Fehlanpassung am antennenseitigen Ende der Zuleitung bestimmt das Stehwellenverhältnis auf der Leitung und die Zusatzverluste. Sind die Verluste einer Leitung bei totaler Anpassung gering – wie etwa bei der symmetrischen Doppelleitung – so sind auch die Verluste durch ein erhöhtes VSWR gering.

Eine 600 Ω Zuleitung mit den sogenannten „Tomatenspreizern“ kann einfachst selbst hergestellt werden. Von käuflichen Doppelleitungen ist abzuraten, da diese durch den geringeren Abstand und das verwendete Material für die Leiter und Isolation hohe Verluste und eine geringe Spannungsbelastung haben.

Mit der Antennenimpedanz $Z_{\text{ant}} = R_{\text{ant}} + j X_{\text{ant}}$ berechnet sich der optimale Wellenwiderstand zu

$$Z_{0,\text{opt}} = \sqrt{R_{\text{ant}}^2 + X_{\text{ant}}^2}, \quad (\text{Gl.1})$$

der allerdings nur in engen Grenzen selbst bestimmt werden kann. Ein guter Wert ist eine Leitung mit einem Realteil des Wellenwiderstandes von $Z_0 = 500$ bis 600Ω .

Beispiel 3.1:

Die Berechnung mit einem Antennenberechnungsprogramm ergab bei der Frequenz $f = 3,6$ MHz eine Antennenimpedanz $\underline{Z} = (450 + j 300) \Omega$. Daraus berechnet sich der Wellenwiderstand für kleinstes VSWR nach (Gl.1) zu $Z_{0,opt} = \sqrt{R_{ant}^2 + X_{ant}^2} = \sqrt{450^2 + 300^2} \Omega = 540 \Omega$.

Die Doppelleitung mit „Tomatenspreizern“ hat bei einem Abstand von $D = 84$ mm und einem Drahtdurchmesser $d = 2$ mm in Luft einen Wellenwiderstand von rund $Z_0 = 530 \Omega$ und ist für die meisten Anwendungen gut geeignet.

Die Impedanz der Doppelleitung ist eine Seite der Medaille und wird durch den Abstand der beiden Leiter und dessen Durchmesser bestimmt, die andere Seite sind stehenden Wellen. Bei einem $VSWR \neq 1$ sind stehende Wellen für Spannung und Strom auf der Leitung vorhanden, die die übertragbare Wirkleistung um den Faktor S des VSWR reduziert.

Beispiel 3.2

Auf einer Antennenzuleitung wird ein $VSWR = 10$ gemessen. Die übertragbare Leistung der Leitung nach Datenblatt ist $P_{max} = 900$ W. Bei einem VSWR von $S = 10$ sinkt die übertragbare Leistung auf den Wert $P_{min} = 900 \text{ W} : 10 = 90 \text{ W}$.

Wird ohne Kenntnis der Zusammenhänge eine größere Leistung übertragen, so wird die Durchbruchspannung U_b der Leitung überschritten. Das führt zu Überschlügen und hohen Verlusten, evtl. zu einem Totalausfall der Leitung - besonders wenn eine kommerzielle Steg-Doppelleitung mit kleinem Leiterabstand verwendet wird.

Beispiel 3.3

Die Durchbruchspannung der 530Ω Doppelleitung liegt bei $U_{b,eff} = 12\,000$ V. Wie hoch ist die maximal übertragbare Leistung, wenn mit einem $VSWR = 50$ an den Bandgrenzen gerechnet wird? Die übertragbare Leistung wird $P_{max} = U_b^2 / (Z_0 * S) = 12000^2 / (530 \Omega * 50) = 5434 \text{ W}$.

Diese maximale Spannung auf der Leitung darf die Durchbruchspannung der Leitung nicht überschreiten. Daher ist ein großer Abstand der beiden Leiter, wie bei einer 530Ω Leitung, sehr von Vorteil.

3.2 Die Drahtstärke und das Material der Zuleitung

Der tatsächlich den HF-Strom führende Querschnitt ist durch den Skin-Effekt kleiner als der, der sich aus dem Durchmesser berechnet. Als Material kommt wieder nur Kupfer, Alu oder die gute alte Bronze zur Anwendung. Bei gewähltem Wellenwiderstand nach Abschnitt 3.1 und bekannter Impedanz der Antenne bestimmt das VSWR auf der Zuleitung die maximalen und minimalen Spannungen und Ströme.

Grundsätzlich führt eine Leitung mit großem Wellenwiderstand bei gleicher Wirkleistung geringere HF-Ströme als eine Leitung mit kleinem Wellenwiderstand. Da sich die Verluste proportional zum Quadrat der Ströme berechnen, sind auch die Verluste auf einer Leitung mit hohem Wellenwiderstand geringer.

Mit der geplanten Leistung P berechnet sich die maximale Effektiv-Spannung auf der Leitung zu

$$U_{max,eff} = \sqrt{P * Z_0 * S} \quad (\text{Gl.2})$$

und daraus der maximale Strom auf der Leitung zu

$$I_{max} = U_{max} / Z_0 \quad (\text{Gl.3})$$

Beispiel 3.4

Die Antennenzuleitung mit „Tomatenspreizern“ hat einen Wellenwiderstand von $Z_0 = 530 \Omega$. Wir wollen die erlaubte Leistung von $P = 750 \text{ W}$ übertragen.

Das Antennenberechnungsprogramm EZNEC sagt uns im Mittel ein $\text{VSWR} = 15$ an den Bandgrenzen, bezogen auf $Z_0 = 530 \Omega$, voraus. Mit (Gl.2) berechnet sich die maximale Effektiv-Spannung auf der Leitung zu $U_{\text{max,eff}} = \sqrt{P * Z_0 * S} = \sqrt{750 \text{ W} * 530 \Omega * 15} = 2442 \text{ V}$ und die Spitzenspannung wird $U_{\text{max}} = 3454 \text{ V}$. Diese liegt unterhalb der Durchbruchspannung, ist aber bei der Konstruktion eventueller Mauerdurchbrüchen etc. zu berücksichtigen.

Der maximale Effektivstrom berechnet sich nach (Gl.3) zu $I_{\text{max,eff}} = 2442 \text{ V} / 530 \Omega = 4,60 \text{ A}$. Der Spitzenstrom, der für die Dimensionierung der Leitung maßgebend ist, ist bei sinusförmigen Vorgängen um den Faktor $\sqrt{2} = 1,4142$ größer. Da der hochfrequente Strom nur in einem dünnen Kreisring des Leiters fließt (äquivalente Leitschichtdicke) ist ein Durchmesser von mindestens $D = 2 \text{ mm}$ Kupfer/Alu zu wählen.

3.3 Die Länge der Zuleitung

Der Länge der Antennenzuleitung wird meist wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Dabei bestimmt sie maßgeblich die Verluste in der gesamten Antennenanlage und ist (leider) nur in engen Grenzen frei wählbar. Die Länge Null, d.h. das Anpassnetzwerk direkt an der Antenne ist selten die beste Lösung, denn auch ein automatischer Koppler direkt an der Antenne verursacht - je nach Antennenimpedanz - hohe Verluste.

Die besondere Eigenschaft und der enorme Vorteil einer verlustarmen Doppelleitung ist die verlustarme Transformation einer Impedanz Z_1 in eine andere Impedanz Z_2 , abhängig von der Länge der Leitung im Verhältnis zur Wellenlänge.

Wir können daher durch richtige Wahl der Zuleitungslänge die Eingangsimpedanz der Leitung so manipulieren, dass die Anpassschaltung möglichst wenig zu „arbeiten“ hat. Ideal wäre, dass die Eingangsimpedanz der Zuleitung identisch mit der Ausgangsimpedanz des Senders ist und ein Koppler entfallen könnte. Da wir aber Mehrband- und Mehrfrequenzbetrieb auf den kurzen Wellen bevorzugen, ist immer ein Koppelmechanismus notwendig.

Das VSWR am Koppler-Eingang muss mittels eines Stehwellenmessgerätes sorgfältig immer auf $S \approx 1$ eingestellt werden. Durch diese einfache Maßnahme haben wir in der gesamten Antennenanlage bis hoch zur Antenne, an jeder Schnittstelle konjugiert komplexe Anpassung, verbunden mit einem maximalen Leistungsfluss in Richtung Antenne. Selbst eine nicht resonante Antenne ist dann angepasst und erhält den maximalen Antennenstrom, der für die Abstrahlung hochfrequenter Leistung maßgebend ist.

Die Zuleitungslänge muss in Abhängigkeit von der Antennenimpedanz also so gewählt werden, dass die Eingangsimpedanz niederohmig (weil der Transceiver niederohmig ist) und möglichst induktiv ist. Die passende Länge der Zuleitung kann mit ausreichender Genauigkeit dem Smith-Diagramm entnommen werden. Für die geometrische Ausführung ist der Verkürzungsfaktor zu berücksichtigen, der bei einer Doppelleitung etwa $v_k = 0,92$ ist.

4. Das Anpassnetzwerk

Ein verlustarmes Anpassnetzwerk hat nur eine Induktivität und nur eine Kapazität in Tiefpasskonfiguration. Nur in besonderen Fällen kann das Anpassnetzwerk lediglich aus (verlustarmen) Kapazitäten bestehen. Um den gesamt-möglichen Impedanzbereich von induktiv bis kapazitiv und nieder- bis hochohmig überstreichen zu können, muss bei einer Tiefpass-LC-Anordnung der Kondensator wahlweise vor oder hinter die Induktivität schaltbar sein.

Anpassnetzwerke in T- oder Pi-Konfiguration haben drei Blindelemente und wurden früher zur besseren Absenkung von Oberschwingungen eingesetzt. Heutige Transceiver sind auf Linearität getrimmt und bedürfen keiner weiteren Selektion am Antennenausgang. Anpassnetzwerke mit 3 Blindelementen sind mehrdeutig in der Abstimmung und haben bei falscher Bedienung hohe Verluste. Besonders tückisch ist das T-Netzwerk. Eine empfindliche Einstellung (schmalbandig) eines Kopplers deutet immer auf eine hohe Betriebsgüte und daher auf hohe Verluste hin.

Je nach Antennenimpedanz führt auch ein Anpassgerät direkt an der Antenne zu hohen Verlusten und zwar dann, wenn die Impedanz der Antenne stark von der Eingangsimpedanz des Kopplers – meist 50Ω - abweicht und die Anpassschaltung viel „arbeiten“ muss. Besonders hohe Verluste sind bei kapazitiv belasteten Antennen vorhanden.

Durch die Wahl der Zuleitungslänge kann immer erreicht werden, dass deren Eingangsimpedanz induktiv ist und eine Kompensation durch verlustarme Kapazitäten bewirkt werden kann. Wird die Lastimpedanz eines Anpassnetzwerkes kapazitiv sind verlustreiche Induktivitäten zur Kompensation notwendig.

5. Die Symmetrierung

Die Doppelleitung stellt gegenüber Erde ein symmetrisches System dar und muss mit dem unsymmetrischen Transceiver/Sender zusammengeschaltet werden. Will man Störungen durch Gleichtakteile vermeiden, so ist eine Symmetrierung mittels Balun erforderlich. Verlustarm sind Luftbalune, einfach in der Herstellung, preiswert und haben keinen Sättigungseffekt. Sie können mit einem inneren Übersetzungsverhältnis 1: 1 hergestellt werden. Die Induktivitäten und Gegeninduktivitäten der verwendeten Spulen beeinflussen das Impedanzgefüge und sind nicht zu vernachlässigen, gehen also mittelbar mit in die Abstimmung ein.

Besonders empfehlenswert sind fertige Variometer aus russischen Beständen mit etwa $L = 11 \mu\text{H}$ primärer Induktivität. Das Variometer wird nur einmal eingestellt und verbleibt dann in dieser Stellung der maximalen Kopplung stehen. Die untere Grenzfrequenz wird durch die primäre Induktivität im Verhältnis zur Quellimpedanz (meist 50Ω) bestimmt. Ob der Balun (Variometer) 1: 4 mit galvanischer Verbindung zwischen Zuleitung und Koppler oder galvanisch getrennt mit einem Übersetzungsverhältnis 1: 1 betrieben wird, ist abhängig von der Eingangsimpedanz der Antennenzuleitung.

Ist die Eingangsimpedanz der Zuleitung hochohmig, so ist ein 1: 4 Balun sinnvoll, ist diese allerdings niederohmig, so ist ein Übersetzungsverhältnis von 1 : 4 mit hohen Verlusten im Anpassnetzwerk verbunden, da die Anpassschaltung wieder von sehr niederohmig auf 50Ω transformieren müsste. Der Übergang von Symmetrisch zu Unsymmetrisch erfolgt immer direkt an Fußpunkt der Antennenzuleitung und hat den mechanischen und elektrischen Vorteil, dass die Anpassschaltung unsymmetrisch, gegen Masse, ausgeführt werden kann.

6. Zusammenfassung

Die einfachen Zusammenhänge gestatten es, auch den nicht technisch so versierten Amateur, eine optimale Antennenanlage für Kurzwellen zu konzipieren. Dabei ist die richtige Länge der Antennenzuleitung von allergrößter Wichtigkeit in Bezug auf die Verluste. Eine vollständige Berechnung zur Ermittlung der abgestrahlten Leistung EIRP ist schon wegen der Selbsterklärung nach BEMFV erforderlich, will man Ärger und Kosten im Störungsfall vermeiden.

Da der Gesetzgeber plant eine SE auch für Leistungen $P < 10 \text{ W}$ EIRP einzuführen und damit QRP Stationen auch unter die Regelung fallen, ist eine genaue Kenntnis der Feldstärken \underline{E} und \underline{H} im Nahbereich der Antennen wegen der einzuhaltenden gesetzlichen Grenzwerte erforderlich. Hier sei auf den Beitrag /6/ hingewiesen.



DL3LH, Walter
wa-schau@t-online.de
www.heide-holst.de
dl3lh@gmx.de
<http://www.baekerei-heitmann.de/DF1BT>

Literatur auf www.ham-on-air.de:

- /1/ „Antennen Messtechnik I bis V“, DL3LH**
- /2/ „Antennen Tuning I – VII“, DL3LH**
- /3/ „Der Skin-Effekt“, DL3LH**
- /4/ „Gibt es den optimalen Antennenkoppler?“, DL3LH**
- /5/ „LC-Anpassnetzwerke“, DL3LH**
- /6/ „Selbsterklärung nach BEMFV“, 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.