

Niedriges SWV - wozu überhaupt?



„KING SWR“

ER HAT KEINE AHNUNG - GEHORCHT IHM NICHT!!!

WARUM?

EINE ANTENNE STRAHLT
BEI HOHEM ODER NIEDRIGEN SWR
IMMER GLEICH GUT!!

Niedriges SWV - wozu überhaupt?

Von Ulrich Gerlach DF4EU, OV M05

Übersicht

1. Einleitung.....	3
2. Niedriges Stehwellenverhältnis aus falschem Grund.....	3
3. Leistungsanpassung.....	4
4. Fehlanpassung.....	5
5. Antenne als Scheinwiderstand.....	6
6. Antennensystem mit konjugiert komplexer Anpassung.....	7
7. Leitungsverluste.....	9
8. Literaturhinweise.....	10
9. Anhang 1: Niedriges SWV aus falschem Grund- Selbstbauprojekt.....	11
10. Anhang 2: Beispielrechnung zu stehenden Wellen.....	15
11. Anhang 3: Diagramm Zusatzverluste.....	17

1. Einleitung

Dieser Artikel ist als Vortrag anlässlich des OV-Abends bei M05 vom 30.7.04 entstanden. Er sollte in Kurzform auf Messungen an Antennen vorbereiten, die auf dem folgenden Fieldday beim Aufbau vorgenommen werden sollten.

Bei der Vorbereitung ist mir ein alter Artikel von M. Walter Maxwell (W2DU) in CQ-DL von 1/1976 [1] in die Hände gefallen, nach dessen Lektüre mir klar wurde, dass sich in Amateurkreisen auch heute noch hartnäckig Missverständnisse bezüglich des SWV halten. Walter Maxwell (nicht zu verwechseln mit dem englischen Physiker James C. Maxwell, 1831-1897!) ist ein anerkannter Antennenspezialist, der sich eingehend mit der Problematik der Antennenanpassung beschäftigt hat und seine Erkenntnisse in vielen Publikationen veröffentlicht hat. Da seine Ausführungen größtenteils theoretischer Natur sind, sind sie zum Teil für den normalen Funkamateurler nur schwer verständlich. **Für die Allgemeinheit kann man nur auszugsweise seine Ergebnisse darstellen ohne auf deren Herleitung einzugehen.** Im Internet findet sich heutzutage eine Vielzahl von Artikeln zu diesem Thema, speziell unter dem Suchbegriff „konjugiert komplexe Anpassung“ bzw. „conjugate match“.

In meinem Vortrag habe ich mich im Wesentlichen auf die Ausführungen von Walter Maxwell bezogen. Ich will nicht verschweigen, dass es auch kritische Stimmen zu seinen umfassenden Theorien gibt. Aber man kann wohl davon ausgehen, dass in manchen Fällen seine Erkenntnisse nicht voll verstanden wurden. So ist es selbstverständlich möglich, gut funktionierende Senderendstufen auch ohne Anwendung der konjugiert komplexen Anpassung mit bestimmten Annäherungen zu konstruieren. Auf jeden Fall bietet die konjugiert komplexe Anpassung ein exaktes Berechnungsverfahren.

2. Niedriges Stehwellenverhältnis aus falschem Grund

Behauptet wird fälschlicherweise:

Eine Antenne strahlt nur bei niedrigem SWV (=Stehwellenverhältnis, oder englisch: SWR = Standing Wave Ratio) richtig, Fehlanpassung führt zu untolerierbaren Verlusten!

Richtig ist: **Eine Antenne strahlt sämtliche ihr zugeführte Leistung unabhängig vom SWV ab!**

Dies heißt nicht, dass das SWV gar keine Bedeutung hat! Ein niedrigeres SWV ist nur wichtig, wenn insbesondere bei höheren Frequenzen und Leistungen im Antennenkabel so hohe Verluste auftreten, so dass diese zur Zerstörung des Kabels führen können. Für die Antennenanpassung ist dies jedoch bedeutungslos. So wird in den allermeisten Fällen oft unter großen Mühen ein niedriges SWV angestrebt, das zwar nicht schädlich aber völlig unnötig ist!

Ein Beispiel hierzu aus der Antennenselbstbaupraxis findet sich in Anhang 1 zu diesem Text.

3. Leistungsanpassung

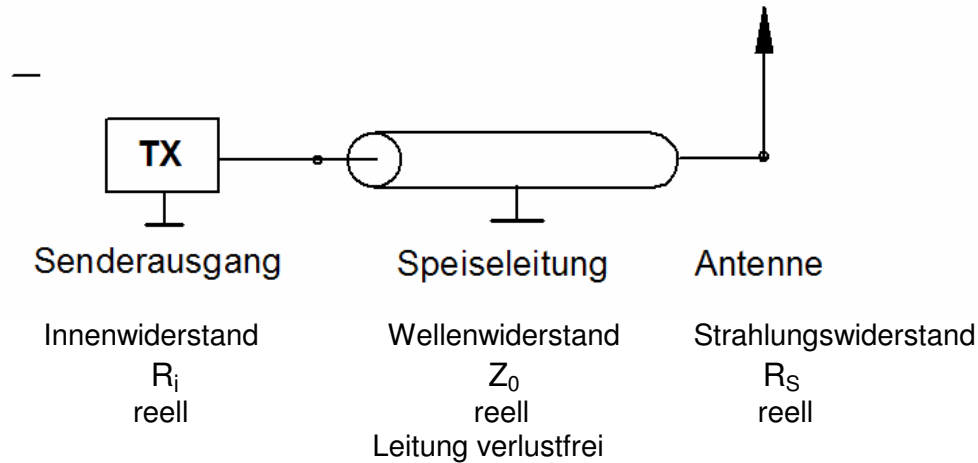


Bild 1: **Typischer Aufbau einer Funkstation**

Annahme: $R_i = Z_0 = R_s$

Systemverluste seien zunächst vernachlässigt. Im optimalen Falle stimmen die charakteristischen Widerstände in diesem System überein: Der Senderausgangswiderstand R_i , der Wellenwiderstand Z_0 des Kabels und der Antennenwiderstand R_s sind ohmsche Widerstände (Wirkwiderstände) und gleich groß, alle angenommen 50Ω .

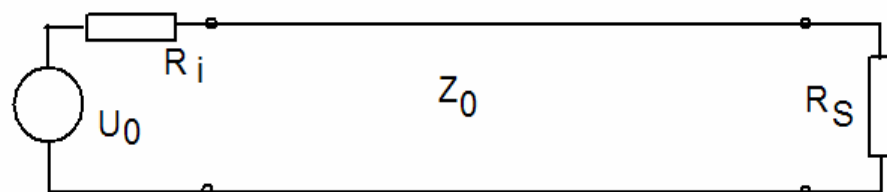


Bild 2: Schaltung mit Leitung

Vom Sender geht eine Wanderwelle aus, die die Leitung entlangläuft und deren Strom- und Spannungsamplituden sich nach dem Wellenwiderstand richten. Die gesamte vom Sender abgegebene Leistung gelangt zur Antenne und wird dort vollständig im Antennenwiderstand absorbiert, d.h. abgestrahlt. Dies ist auch die maximal mögliche Leistung, die der Sender über die Leitung an die Antenne überhaupt abgeben kann.

4. Fehlanpassung

Vom Zustand der Anpassung ausgehend wird der Antennenwiderstand R_s von 50Ω auf 25Ω verändert. Beim Einschalten des Senders bemerkt dieser zunächst nichts von der Änderung seiner Last. Strom- und Spannungswelle auf der Leitung richten sich wie zuvor nach dem Wellenwiderstand Z_0 . Wenn die Wanderwelle an der Antenne eintrifft, findet sie hier den von Z_0 abweichenden Widerstand R_s vor. Um beiden Bedingungen zu genügen, wird jetzt eine neue Wanderwelle von der Antenne in Richtung Sender reflektiert. Hin- und rücklaufende Wanderwellen überlagern sich zu einer **stehenden Welle** jeweils für Strom und Spannung auf der Leitung. Wenn die rücklaufende Welle wieder beim Senderausgang eintrifft, kann sich dieser auf die neuen Bedingungen am Leitungsende einstellen und seine Leistungsabgabe (entsprechend der Abweichung von der optimalen Leistungsanpassung) verringern.

Zur Berechnung der Zustände auf der Leitung dient das **Stehwellenverhältnis (SWV) s** , definiert zu $s = U_{\max}/U_{\min}$. ($U_{\max}$ = Höchstwert, $U_{\min}$ = Kleinstwert der Spannung entlang der Leitung). Es ist zu errechnen aus $s = R_s/Z_0$ für $R_s > Z_0$ bzw. $s = Z_0/R_s$ für $R_s < Z_0$. Das SWV kann so nur Werte von $s = 1$ bis $s = \infty$ annehmen. Im obigen Fall wird $s = 50\Omega/25\Omega = 2$.

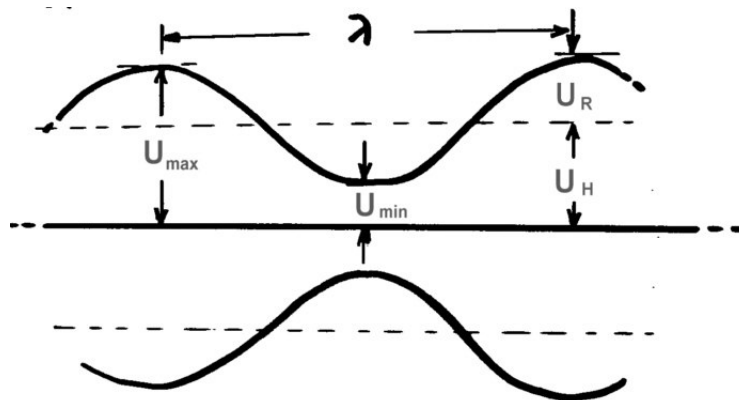


Bild 3: Stehende Welle

Die maximale Spannung der stehenden Welle ergibt sich aus $U_{\max} = U_H + U_R$, die minimale Spannung aus $U_{\min} = U_H - U_R$. (U_H = hinlaufende, U_R = rücklaufende Spannungswelle). Bei $s = 1$ gibt es keine rücklaufende Welle, also muß $U_R = 0$ sein, dann wird $U_{\max} = U_{\min} = U$, d.h. es gibt keine stehende Welle. Die Spannung U hat an allen Punkten entlang der Leitung denselben Wert. Dies entspricht wieder dem Zustand der Leistungsanpassung, in dem U exakt halb so groß ist, wie die Leerlaufspannung U_0 des Senders. Bei Leerlauf am Leitungsende ist $U_R = U_H$. $U_{\max}$ wird $2 U_H = U_0$ und $U_{\min}$ wird dann 0. Bei Kurzschluß ist $U_R = -U_H$. $U_{\max}$ wird 0 und $U_{\min} = 2 U_H = U_0$. ($U_{\max}$ und $U_{\min}$ tauschen ihre Bedeutung).

Eine Beispielrechnung mit Zahlenwerten hierzu findet sich in Anhang 2 zu diesem Text.

Der Sender kann also im Zustand der Fehlanpassung ($s > 1$) nicht mehr seine volle Leistung abgeben. Dies hat jedoch nichts mit der Schutzschaltung der modernen Senderendstufen zu tun, die bei Überschreitung eines bestimmten SWV- Wertes ihre Leistungsabgabe herunterregeln. **Der Sender verringert seine Leistung genau um den Betrag der an der Antenne reflektierten Leistung (= Reflektionsverluste).** Der Antenne steht also dieser Leistungsanteil nicht mehr zur Abstrahlung zur Verfügung, dennoch strahlt sie die gesamte ihr angebotene Leistung ab, d.h. die Leistung bei Leistungsanpassung vermindert um die Reflektionsverluste. **Die Reflektionsverluste gehen also nicht in der Antenne verloren sondern entstehen durch die Fehlanpassung der Antenne an den Wellenwiderstand !**

5. Antenne als Scheinwiderstand

Eine Antenne besitzt nur bei ihren natürlichen Resonanzen einen reinen Wirkwiderstand R_s , also z.B. der schlanke Dipol bei $l/\lambda = 0,5, 1,0$ etc. Behauptet wird öfter fälschlicherweise in Amateurräumen, dass eine Antenne nur bei diesen Resonanzen sinnvoll betrieben werden könnte. Denn außerhalb dieser Resonanzen bekommt der Antennenwiderstand entweder kapazitive Anteile (die Antenne wird unterhalb ihrer Resonanzfrequenz betrieben) oder induktive Anteile (die Antenne wird oberhalb ihrer Resonanzfrequenz betrieben). **Die Last des Senders gemäß Bild 1 ist außerhalb der Resonanz der Antenne also nicht mehr einfach ein reiner Wirkwiderstand sondern ein Scheinwiderstand, bestehend aus R-, L- und C- Komponenten.** Für die Abstrahlung ist jedoch nach wie vor nur die ohmsche (=Wirk-) Komponente maßgebend.

Für diesen allgemeineren Fall der Fehlanpassung ist nun ähnlich wie für den einfachen Fall des Abschlusses mit einem ohmschen Widerstand die Bedingung der maximalen (Wirk-)Leistungsabgabe des Senders bei Variation der Reaktanzen im System zu ermitteln.

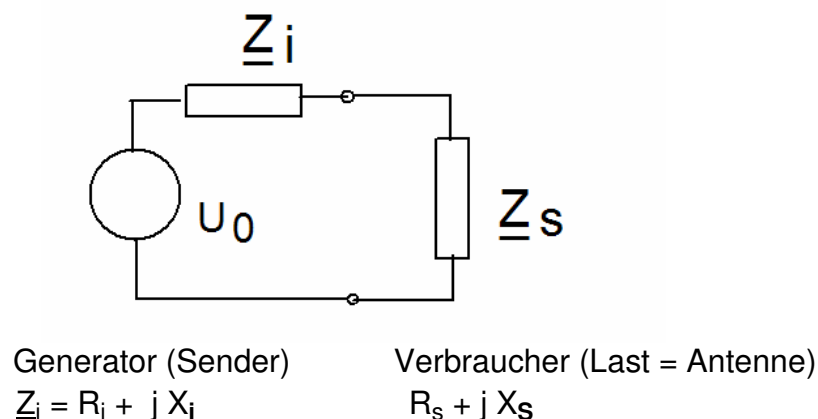


Bild 4: Berücksichtigung der Scheinwiderstände

Als Ergebnis dieser Ermittlung findet man, dass für die maximale Leistungsabgabe $P_{\max}$ sich induktive und kapazitive Anteile im System kompensieren müssen und zwar unabhängig von der Größe der Wirkanteile R_i und R_s .

$P_{\max}$ für $X_i = -X_s$

D.h. die Widerstände Z_i und Z_s müssen sich konjugiert komplex verhalten, in der Schreibweise der komplexen Rechnung lautet diese Bedingung:

$$Z_i = R_i + j X_i = R_s - j X_s = Z_s^*$$

Das Ergebnis dieser Berechnung ist:

$$P_{\max} (X_i = -X_s) = \frac{U^2 \cdot R_s}{(R_i + R_s)^2}$$

Konjugiert komplexe Anpassung ermöglicht maximale Leistungsabgabe, und zwar unabhängig von den Wirkwiderständen im System!

6. Antennensystem mit konjugiert komplexer Anpassung

In der Anwendung auf Antennensysteme heißt das, dass die Fehlanpassung an den Wellenwiderstand Z_0 absolut keinen Einfluss auf die abgestrahlte Leistung hat! Eine Verkleinerung des SWV kann nichts mehr bringen, weil eben nicht mehr als die maximal mögliche Leistung abgestrahlt werden kann! Jede Anstrengung in dieser Richtung bleibt ohne Wirkung!

Die konjugiert komplexe Anpassung kann an beliebiger Stelle im System vorgenommen werden. **Besteht an einer Stelle im System jedoch konjugiert komplexe Anpassung, so wirkt sie sich im gesamten System aus!**

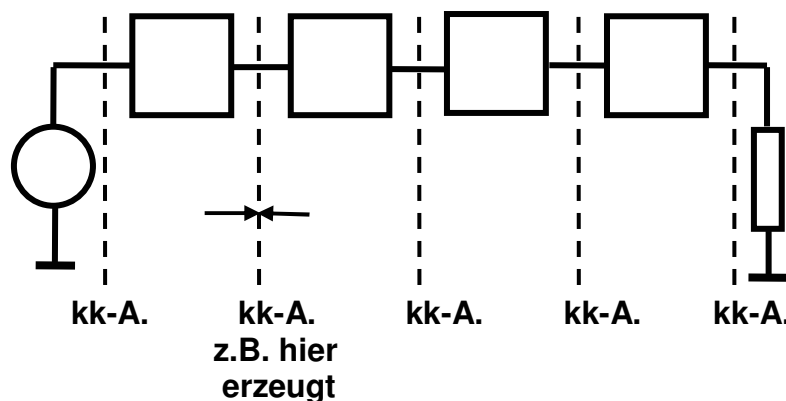


Bild 5: Konjugiert komplexe Anpassung (kk-A.)

Die konjugiert komplexe Anpassung kann mit einem gebräuchlichen **Anpassungsnetzwerk** (Matchbox, Antennentuner) vorgenommen werden. Dieses stellt die erforderlichen Reaktanzen zur Kompensation zur Verfügung. Auch mit anderen üblichen Methoden zur Anpassung (Kabelstücke) kann gearbeitet werden. Dabei spielt es keine Rolle, wo sich das Anpassungsnetzwerk befindet. Sinnvollerweise wird man es in der Nähe des Senders anordnen, wo es am leichtesten zugänglich ist. Dies bietet den weiteren Vorteil, dass sich jede Antenne breitbandig nutzen lässt. Bei Abweichung von ihrer natürlichen Resonanzfrequenz werden die Blindanteile kompensiert, für die Abstrahlung ist nur die Wirkkomponente des Antennenwiderstandes maßgeblich. Die Fehlanpassung an den Wellenwiderstand des Kabels (SWV) ist zu vernachlässigen. Ferngesteuerte Anpassungsnetzwerke am Antennenfußpunkt bringen also absolut nichts (außer ihrem Hersteller). Ihre Anwendung zeigt nur, dass die Bedeutung des SWV nicht wirklich verstanden wurde.

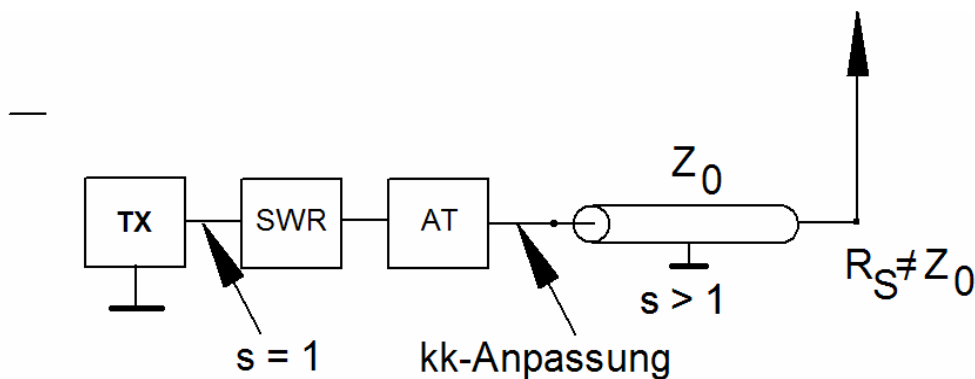


Bild 6: Antennensystem mit konjugiert komplexer Anpassung

Wird das Anpassungsnetzwerk wie in Bild 6 eingesetzt, steht der Antenne die volle vom Sender erzeugte Leistung zur Verfügung, denn der Sender ist durch das vorgeschaltete Anpassungsnetzwerk optimal angepasst. Am Antennenfußpunkt treten durch die Fehlanpassung Reflektionen auf, die zum Leitungsanfang zurücklaufen. Hier befindet sich das Anpassungsnetzwerk, an dessen Ausgang sich jetzt hin- und rücklaufende Wellen so überlagern, als ob hier Leerlauf vorliegt. Daher gelangt die rücklaufende Welle durch vollständige Reflexion ($r = +1$) wieder zurück zur Antenne und dort zur Abstrahlung. Der Vorgang wiederholt sich mit immer kleineren Amplituden. Im Endeffekt gelangt die gesamte vom Sender abgegebene Leistung so zur Antenne. Eine Beschädigung der Senderausgangskreise durch die rücklaufenden Wellen ist nicht zu befürchten.

Bei den meisten Funkamateuren kommt wohl die Anordnung nach Bild 6 mit besten Ergebnissen zur Anwendung, ohne die konjugiert komplexe Anpassung überhaupt zu bedenken. Meistens wird aber noch mit mehr oder weniger aufwendigen Methoden versucht, das SWV auf der Leitung zu reduzieren. Dies ist in den meisten Fällen jedoch absolut unnötig!

7. Leitungsverluste

Bisher wurde Verlustfreiheit im Antennensystem angenommen. In der Praxis treten jedoch vor allem Antennenverluste, Erdungsverluste und Kabelverluste in Erscheinung, die alle möglichst gering gehalten werden sollten.

Bei den **Antennenverlusten** spielt die mechanisch einwandfreie Ausführung eine große Rolle. Herstellerangaben hierzu sind selten oder gar nicht zu bekommen, zumal diese Werte stark von Aufbau und Alterung (Korrosion) abhängen. Gewinnangaben sagen hierüber nichts aus!

Erdungsverluste sind besonders bei unsymmetrischen Antennen (GP) und Antennen mit niedrigen Strahlungswiderständen von Bedeutung. Sie können nur durch aufwendige Erdnetze klein gehalten werden. Sonst geht u.U. ein großer Teil der Sendeleistung als Wärme im Erdboden verloren!

Die **Leitungsverluste** (Kabelverluste) sind durch Auswahl hochwertiger Kabel zu beherrschen. Im KW-Bereich sind diese Verluste selbst bei großen Kabellängen bedeutungslos. Beispiel: 25 m RG213 Kabel haben bei 30 MHz eine Dämpfung von nur 0,9 dB.

Bei höheren Frequenzen und Leistungen sind die Verluste jedoch zu überprüfen, da sie selbstverständlich auch bei einem SWV von $s = 1$ auftreten und die abgestrahlte Leistung vermindern. Beispiel: 25 m RG213 Kabel haben bei 500 MHz eine Dämpfung von ca. 4 dB.

Es ist zu beachten, dass bei einem SWV > 1 **Zusatzverluste** im Kabel anfallen. Wie oben gezeigt wurde (siehe auch Anhang 2), bewirkt ein hohes SWV höhere Ströme und Spannungen entlang der Leitung. So können Wärmeverluste und dielektrische Verluste entstehen, die im Extremfall zur Zerstörung des Kabels führen. Beträgt beispielsweise die gesamte Dämpfung eines beliebigen Kabels beliebiger Länge bei exakter Anpassung ($s = 1$) 10 dB, so entstehen zusätzliche Verluste durch stehende Wellen bei einem SWV von $s = 10$ (!!!) in Höhe von 5 dB. **Siehe hierzu das Diagramm „Zusatzverluste“ in Anhang 3.** Im Betrieb würde sich dies trotz dieser äußerst ungünstigen Werte durch eine geringere Signalstärke beim Empfänger von weniger als einer S-Stufe auswirken. **Nur falls das Kabel dieser zusätzlichen Belastung nicht standhält, muß man versuchen, das SWV zu verringern- und dies ist der einzige Grund dafür!** Dazu sind u.U. auch Maßnahmen an der Antenne selbst erforderlich, z.B. Veränderung von Länge und Dicke, Einspeisung über Anpassungselemente.

8. Literaturangaben

[1] Eine andere Betrachtungsweise über Reflexionen auf Speiseleitungen – Niedriges SWR aus falschem Grund von M.Walter Maxwell W2DU/W8KHK, Übersetzung aus QST, April 1974, von Walther Kawan, DL1UU erschienen in CQ-DL 1/1976

[2] The SWR Obsession von Steve Ford, WB8IMY, QST

[3] Arrl and the Conjugate Match von Dean Straw N6BV, ARRL, ARRL Antenna Book Editor

[4] The 1987 ARRL-Handbook (oder spätere Ausgaben), Chapter 16 Transmission Lines

[5] Antennenbuch von Karl Rothammel

[6] A.R.E.S. Niagra Tech Note 11 – VSWR Etc

[7] Reflections von M.W. Maxwell, siehe W2DU's Homepage
<http://home.iag.net/~w2du>

Anhang 1: Niedriges SWV aus falschem Grund – Selbstbauprojekt [6]

Unser Funkfreund beabsichtigt, sich eine Superantenne aufzubauen- alles nur vom Feinsten. Es soll eine schlanke Groundplane für das 40m-Band werden. Er will sogar ein Erdnetz mit 60 Radials in Spatentiefe anlegen, was seinen Garten vollkommen verwüsten wird. Aber damit lassen sich die Erdungsverluste auf ein Minimum reduzieren. Auch für die Zuleitung will er hochwertiges Koaxialkabel einsetzen. So lässt sich sicher ein Antennenwirkungsgrad von rechnerisch stolzen 100% erreichen.

Die aufgebaute Antenne ist auf Folie 1 gezeigt.

Aber trotz des enormen Aufwandes stellt unser Funkfreund bei ersten Messungen fest, dass seine Superantenne nur ein SWV von $s = 1,6$ erreicht, mit leichtem Anstieg zu den Bandgrenzen. Darüber ist er maßlos enttäuscht, aber eine kleine Rechnung würde ihm zeigen, dass das völlig in Ordnung ist. Mit $s = Z_0/R_S$ erhält man aus $R_S = 32 \Omega$ und $Z_0 = 50 \Omega$ den Wert $s = 1,56$. Er ist nicht zufrieden, weil er meint, dass nur eine Antenne, die mit einem SWV von $s = 1$ betrieben wird, optimal funktioniert. Die Abweichung von $s = 1$ sieht er als Verlust von Strahlungsleistung an, die sein Signal schwächt.

Durch Experimentieren findet er schließlich Abhilfe: Er stellt fest, dass mit Verringerung der Anzahl der Radials des Erdnetzes das SWV fällt und so gräbt er bis auf 10 Stück die Radials wieder aus – jetzt hat er das ersehnte SWV von $s = 1$ nahezu erreicht. Er kann stolz auf seinen Erfolg sein!

Die verschlimmbesserte GP ist auf Folie 2 gezeigt.

Aber irgendwann bekommt er doch Bedenken, denn so richtig spielt seine Antenne doch nicht. Die erhofften Ergebnisse beim Funkbetrieb wollen sich nicht einstellen. Was ist falsch gelaufen?

Unser Funkfreund weiß nicht, dass die Abstrahlung einer Antenne völlig unabhängig vom SWV ist!

Sein 50 Ω -Dummyload hat auch ein SWV von $s = 1$ und strahlt gar nicht! Bei der Verringerung der Anzahl der Radials hat er nicht bedacht, dass sich damit der Erdungswiderstand drastisch erhöht! Um das SWV von $s = 1$ zu erhalten, muß der Erdungswiderstand auf $R_E = 18 \Omega$ ansteigen, denn $s = 50 / (32 + 18) = 1,0$! Betrachtet man den Wirkungsgrad der Antenne, so beträgt dieser nur noch 64%, d.h. 36 % der zugeführten Sendeleistung werden nur den Erdboden erwärmen und nicht abgestrahlt!!

Was hätte er an der Antenne tun sollen? Absolut gar nichts!!!

Mit seiner Matchbox am Senderausgang hätte er das SWV auf $s = 1$ einstellen sollen, damit sein Sender durch die optimale Anpassung an den Wellenwiderstand der Zuleitung seine maximal mögliche Leistung abgeben kann. Die konjugiert komplexe Anpassung durch die Matchbox bewirkt, dass die Reflexionsverluste am Antennenfußpunkt (durch das von 1 abweichende SWV) komplett

von der Matchbox zur Antenne als Reflexionsgewinn zurückfließen. So wird die Sendeleistung vollständig abgestrahlt!

Eigentlich hätte er überhaupt nichts zu machen brauchen, wenn sein Senderausgang das SWV von $s = 1,6$ toleriert- was ziemlich sicher ist. Der Reflexionsverlust, der nun ohne Matchbox (d.h. ohne konjugiert komplexe Anpassung) nicht durch einen entsprechenden Reflexionsgewinn ausgeglichen wird, ist so gering, dass er sich nur unmerklich in der Signalstärke bei der Gegenstation bemerkbar macht!

Angenommen, sein Sender kann bei Leistungsanpassung maximal $P_{\max} = 150$ W abgeben.

Bei $s = 1,56$ ist der zugehörige Reflektionsfaktor für Spannungen und Ströme $r = (s - 1)/(s + 1) = 0,56/2,56 = 0,218$. Für die Leistung gilt dann der Reflektionsfaktor $r_P = r^2 = 0,0478$.

Die am Antennenfußpunkt reflektierte Leistung beträgt damit $P_R = P_{\max} \cdot r_P = 150 \text{ W} \cdot 0,0478 = 7,17 \text{ W}$. Für die Antenne verbleiben nur $P_{\max} - P_R = 142,8 \text{ W}$. Die 7,17 W entsprechen, bezogen auf $P_{\max}$, einem Verlust von 4,78 % bzw. wenn die sich die Leistung von 150 W auf 142,8 W verringert, von $10 \log(142,8/150) \text{ dB} = -0,21 \text{ dB}$. Diese Veränderung wirkt sich, wie gesagt, nur unmerklich auf die Signalstärke beim Empfänger aus.

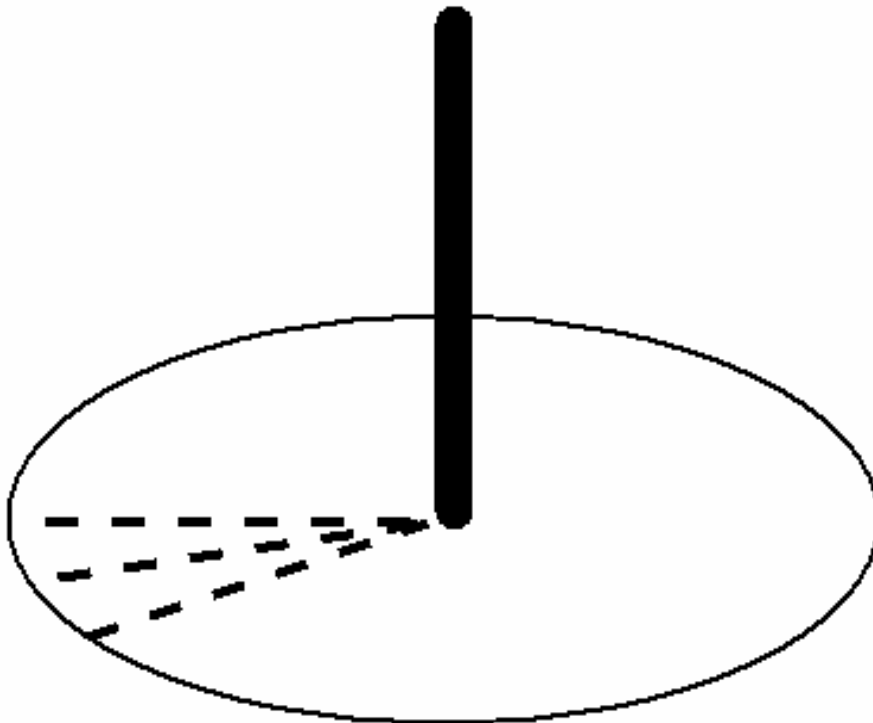
Erst wenn das SWV $s = 6$ wird, wird entsprechend obiger Rechnung ca. die Hälfte der Leistung am Antennenfußpunkt reflektiert. (Allerdings dürfte der Senderausgang dieses SWV so nicht mehr zulassen!) Der Verlust beträgt nun 3 dB in der Signalstärke und damit gerade eine halbe S-Stufe. Auch diese Abnahme ist im Allgemeinen zu vernachlässigen! Und selbst dieser Verlust lässt sich durch Einsatz einer Matchbox am Senderausgang vollkommen vermeiden, obwohl das SWV von $s = 6$ auf der Leitung weiterhin bestehen bleibt!

Warum hält sich also unter Funkamateuren dennoch hartnäckig das Streben nach einem niedrigen SWV?

Niedriges SWR aus falschem Grund:

***Es bringt nichts –
es kostet nur Mühen und Geld!***

Einzige seltene Ausnahme: Bei großer Kabeldämpfung in Verbindung mit hoher Sendeleistung im VHF/UHF- Bereich kann durch die Zusatzverluste bei sehr hohem SWV das Kabel beschädigt werden.



Designfrequenz: 7,05 MHz

Abmessungen: Höhe: $\lambda/4$, Dicke $d \ll \text{Höhe}$ (schlank)

Strahlungswiderstand: 32 Ohm

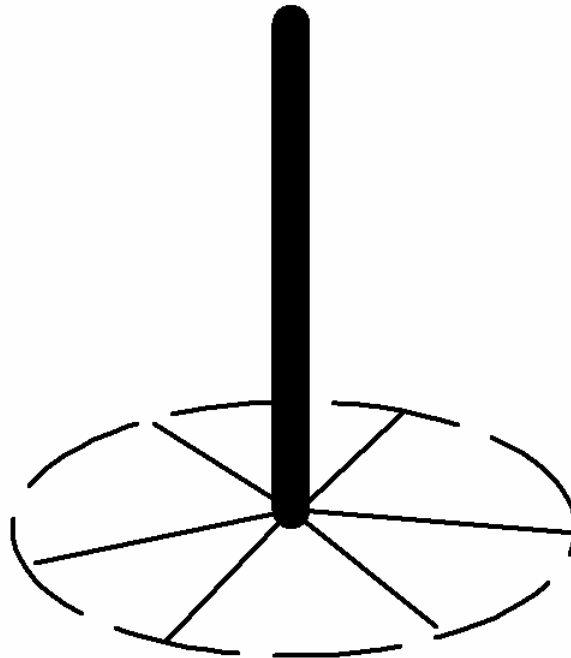
Erdungswiderstd: ≈ 0 Ohm (idealer Boden, 60 Radials)

Zuleitung: 50 Ohm-Coaxkabel

SWR $s = 50/32 = 1,56$

Wirkungsgrad: $\eta = R_s / (R_s + R_v) = 32/(32+0) = 1,0$

also 100%, d.h. verlustfrei



Designfrequenz: 7,05 MHz

Abmessungen: Höhe: $\lambda/4$, Dicke $d \ll \text{Höhe}$ (schlank)

Strahlungswiderstand: 32 Ohm

Erdungswiderstand: 18 Ohm (nur 10 Radials)

SWR: $s = 50 / (32 + 18) = 1,0$

Wirkungsgrad $\eta = R_s / (R_s + R_v) = 32 / (32 + 18) = 0,64$
also 64% , d.h. 36% Verluste im Erdboden!

Anhang 2: Beispielrechnung zu stehenden Wellen

Neben dem SWV dient auch der Reflektionsfaktor r zur Berechnung der Anpassungsverhältnisse auf der Leitung.

Der Reflektionsfaktor r ist definiert zu

$$r = \frac{U_R}{U_H}.$$

Die Bezeichnungen sind gemäß Bild 3 im Haupttext gewählt.

U_R = reflektierte Welle

U_H = hinlaufende Welle

$U_{\max} = U_H + U_R$ (maximale Spannung auf der Leitung)

$U_{\min} = U_H - U_R$ (minimale Spannung auf der Leitung)

Bei Anpassung ist $U_R = 0$, d.h. $r = 0$.

Bei Leerlauf ist $U_R = U_H$, d.h. $r = 1$.

Bei Kurzschluss ist $U_R = -U_H$, d.h. $r = -1$.

Wertebereich für r : $-1 \leq r \leq 1$.

Der Zusammenhang mit dem SWV ist

$$r = \frac{s-1}{s+1}, \text{ bzw. umgekehrt } s = \frac{1+r}{1-r}.$$

Weiterhin gilt mit Lastwiderstand R_S und Wellenwiderstand Z_0 :

$$r = \frac{R_S - Z_0}{R_S + Z_0}.$$

Die Quellspannung des Senders betrage $U_0 = 300 \text{ V}$. Für den Fall der Anpassung am Senderausgang ($R_i = Z_0 = 50 \Omega$) wird die zur Antenne hinlaufende Spannung $U_H = 150 \text{ V}$. Mit einem Lastwiderstand (=Antennenwiderstand) von $R_S = 100 \Omega$ ergibt sich am Leitungsende bei Fehlanpassung ein SWV von $s = R_S / Z_0 = 100 \Omega / 50 \Omega = 2$

bzw. ein Reflektionsfaktor mit den Widerständen

$r = (100 \Omega - 50 \Omega) / (100 \Omega + 50 \Omega) = 1/3$.

Oder auch mit $s = 2$ errechnet: $r = (2-1)/(2+1) = 1/3$.

Jetzt kann man die rücklaufende Spannung U_R bestimmen:

$U_R = r \cdot U_H = 1/3 \cdot 150 \text{ V} = 50 \text{ V}$.

Die maximale Spannung auf der Leitung bei $s = 2$ ist also

$U_{\max} = U_H + U_R = 150 \text{ V} + 50 \text{ V} = 200 \text{ V}$.

Vergrößert man die Fehlanpassung z.B. mit $R_S = 500 \Omega$ auf $s = 10$, so wird $r = 9/11$ und damit $U_R = r \cdot U_H = 9/11 \cdot 150 \text{ V} = 122,7 \text{ V}$. Die maximale Spannung

auf der Leitung wird für diesen Fall $U_{\max} = U_H + U_R = 150 \text{ V} + 122,7 \text{ V} = 272,7 \text{ V}$, gegenüber 150 V im angepassten Zustand.

Mit zunehmendem SWV nimmt also die Spannung auf der Leitung zu. Dies gilt ebenso für den Strom. Damit steigen die Verluste auf der Leitung. U.U. muß geprüft werden, ob die Leitung der erhöhten Beanspruchung durch Fehlanpassung gewachsen ist.

Die maximal zulässige Spannung des RG-58 Kabels beträgt 1,9 kV, für das RG-213 Kabel gilt ein Wert von 5 kV. [4]

In Anhang 3 sind in einem Diagramm die Zusatzverluste in Abhängigkeit vom Stehwellenverhältnis auf der Leitung dargestellt.

Anhang 3: Diagramm Zusatzverluste [5]

