

Rund um die Antenne

Praxisorientierte Antennenkunde für Funkamateure

**Teil 2:
Speisekabel, SWR**

Max Rügger, HB9ACC

Allen Freunden des Selbstbaus gewidmet

Rund um die Antenne
Teil 2: Speisekabel, SWR

Inhaltsverzeichnis

		Seite
2	Rund um die Antenne, Teil 2	
	Vorwort	5
2.1	Speisekabel	7
2.1.1	Unsymmetrische Kabel = Koaxialkabel	7
2.1.2	Symmetrische Speiseleitungen	9
2.1.2.1	Hauseinführungen bei symmetrischen Leitungen	11
2.1.2.2	Übergang von symmetrischer Leitung auf Koax-Kabel	11
2.1.3	Kabelverluste	14
2.1.4	Elektrische Belastung eines Koaxial-Kabels	16
2.1.4.1	Die thermische Belastbarkeit eines Koaxial-Kabels	16
2.1.4.2	Die spannungsmässige Belastbarkeit eines Koaxial-Kabels	16
2.1.5	Verkürzungsfaktor	17
2.1.6	Verlegung von Koaxial-Kabel	19
2.1.7	Anschluss des Speisekabels an die Antenne	20
2.2	SWR & Cie.	21
2.2.1	Allgemeine Bemerkungen zum Thema „SWR“	22
2.2.2	Die Antenne hat ein schlechtes SWR	24
2.2.3	Grundlagen zum Thema „SWR“	25
2.2.4	Vorgehen wenn auf der Speiseleitung SWR auftritt	27
2.2.4.1	SWR bestimmen	28
2.2.4.2	Kabelverluste bestimmen	28
2.2.4.3	Zusatzverluste durch das SWR bestimmen	29
2.2.4.4	Entscheidung → wagt man's oder nicht ?	30
2.2.4.5	Wenn ja, mittels Antennenkoppler Totalreflexion herstellen	31
2.2.5	Was passiert bei der Totalreflexion	32
2.2.6	SWR Verbesserung durch lange Speiseleitungen	34
2.2.6.1	Welches ist das wahre SWR auf der Speiseleitung	34
2.2.6.2	Berechnung des SWR am Antennenspeisepunkt	34
2.2.6.3	Einfluss der Speisekabellänge auf das SWR	36
2.2.6.4	Auswirkungen des SWR bei symmetrischen Speiseleitungen	37

Rund um die Antenne
Teil 2: Speisekabel, SWR

Vorwort

Die erste Version dieses Dokumentes, damals unter dem Namen „Drahtantennen Praktikum“, ist zu dem Zeitpunkt entstanden als allen YL's und OM's deren Funkverkehr sich bisher auf Frequenzen oberhalb 30 MHz beschränkt hat damals neu den Zugang zur Kurzwelle erhalten haben.

Ich habe das Dokument damals meinen Freunden und Amateurfunker-Kollegen zur Verfügung gestellt. Das grosse Echo, das dadurch ausgelöst wurde hat, hat mich bewogen das Dokument laufend zu überarbeiten und weitere Erfahrungen einfließen zu lassen.

Einige Bemerkungen zum Dokument:

- Dieses Dokument ersetzt kein Antennenbuch und es enthält keine Kochrezepte. Mein Ziel war es die Materie von der praktischen Seite her anzugehen. Überdies ist es ein Ziel von mir das Verständnis für Antennen im allgemeinen und Drahtantennen im speziellen zu wecken. Die dazugehörigen Formeln, die es einem erlauben die Drahtlängen zu berechnen, findet man in jedem Antennenbuch. In jedem Antennenbuch finden sich auch jede Menge Formeln deren Herleitung wohl nur für wenige von uns nachvollziehbar ist. Ich versuche mit Betrachtungen über den Spannungs- und Stromverlauf auf Antennen das Verständnis für Probleme der Anpassung, SWR etc. zu wecken.
- Das Dokument enthält auch Information rund um die Antenne, also Materialkunde, Informationen über Speiseleitungen, Baluns, nützliche Messgeräte etc.
- Das Dokument befasst sich nicht mit Mehrelementantennen, wie Yagis, Mehrelement Quads, etc. Es beschränkt sich weitgehend auf Antennenformen die vom „ganz normalen OM“ im Selbstbau erstellt werden können.
- Dieses Dokument enthält wahrscheinlich nichts was man nicht auch anderswo nachlesen könnte.
- Dieses Dokument hat keinen kommerziellen Hintergrund. Ich habe mir deshalb gestattet für gewisse Darstellungen auf vorhandene Schemas, Zeichnung, Skizzen etc. zurückzugreifen.
- Ich verwende im Text häufig den Ausdruck OM. Damit sind natürlich auch alle YL's und XYL's gemeint. Der Ausdruck OM hat einfach meine Schreibarbeit vereinfacht. Man verzeihe mir das.

Auch wenn dieser Beitrag zum Thema Antennen nicht vor mathematischen Formeln und algebraischen Abhandlungen strotzt, ich persönlich habe als Fernmelde-Ingenieur keine Berührungspunkte mit der Theorie und der Mathematik. Ganz im Gegenteil. Ich selbst versuche immer wieder die Aussagen die ich mache mathematisch und von der Theorie her zu unterlegen.

Ich habe aber volles Verständnis für alle OM's die mit der Mathematik nicht unbedingt auf Du und Du sind und die sich lieber mit den praktischen Belangen auseinandersetzen. Wer einmal die grundlegenden Elemente der Antennentechnik verstanden hat, der ist in der Lage irgendwo auf der Welt, ohne grosse Hilfsmittel, lediglich mit einem Metermass in der Hand, Antennen zu erstellen die funktionieren.

Es ist mir wichtig Erklärungen und Anregungen zu geben die den Freunden des Selbstbaus weiterhelfen.

Rund um die Antenne

Teil 2: Speisekabel, SWR

Das Dokument ist in 7 Teil-Dokumente aufgegliedert:

- **Teil 1**
 - allgemeine Hinweise
 - Materialkunde
 - Blitzschutz
 - Sicherheit
 - Masten

- **Teil 2**
 - Speisekabel
 - SWR

- **Teil 3**
 - Antennenkoppler
 - SWR-Meter
 - Instrumente
 - Baluns

- **Teil 4**
 - Antennen-Theorie
 - Antennen-Simulation

- **Teil 5**
 - Dipole
 - Windom-Antennen
 - Trap-Antennen
 - Langdraht-Antennen

- **Teil 6**
 - Ganzwellen-Dipol
 - L-Antennen
 - Sloper
 - Schleifenantennen
 - Vertikal-Antennen

- **Teil 7**
 - spannungsgespeiste resonante Antennen
 - verkürzte Antennen
 - Sonderformen verkürzter Antennen

Wichtiger Hinweis:

Die in dieser Dokumentation gemachten Angaben zu Schaltungen und Verfahren etc. werden ohne Rücksicht auf die Patentlage mitgeteilt. Sie sind ausschliesslich für Amateur- und Lehrzwecke bestimmt und dürfen nicht gewerblich genutzt werden. Der Autor hat die Angaben mit grösster Sorgfalt und nach bestem Wissen und seinen Erfahrungen zusammengestellt. Der Autor weist darauf hin, dass er weder Garantie noch die juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für Folgen die auf fehlerhafte Angaben oder Auslegung direkt oder indirekt zurückgehen übernehmen kann.

Ich wünsche allen OM's, YL's und XYL's viel Erfolg und Befriedigung mit unserem weltumspannenden schönen gemeinsamen Hobby Amateurfunk.

März 2007

73 de Max Rügger / HB9ACC

2.1 Speisekabel

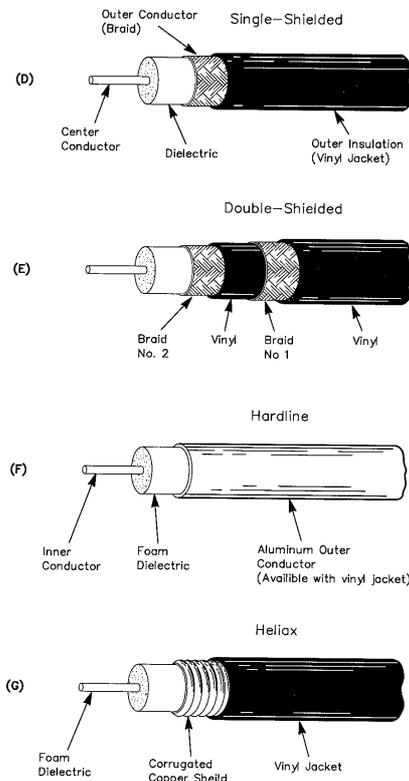
Wer sich bisher fast exklusiv mit VHF und UHF befasst hat für den ist eine der kritischen und wichtigen Frage „was für ein Koaxialkabel“ er verwendet. Die Güte und Verlustfreiheit des Speisekabels kann für den Erfolg entscheidend sein. Wir befassen uns hier mit KW Antennen und die Frage des Koaxialkabels ist viel weniger kritisch.

2.1.1 unsymmetrische Kabel = Koaxialkabel

Im allgemeinen verwendet der Funkamateuer auf KW folgende Koaxialkabel-Typen:

- **RG-58**
Dieses Kabel ist im Alltagsgebrauch für Leistungen bis 100 W i.O. Die Spannungsfestigkeit beträgt 1900 V. Hier schlägt auch bei einem etwas erhöhten SWR noch nichts durch. Allerdings liegen die Dämpfungswerte von RG-58 im Vergleich mit RG-213 doppelt so hoch. Wer bei seiner Antenne Anpassungsprobleme hat, d.h. er arbeitet mit einem erhöhten SWR, dem sei empfohlen auch bei der Standardleistung der meisten heutigen Amateurtransceiver, nämlich 100 W, bereits das bessere Kabel (sprich RG-213) zu verwenden.
- **RG-213**
Dies ist das übliche Kabel für längere Leitungen, höhere Leistungen und für alle Anwendung bei denen ein hohes SWR zu erwarten ist. Die Spannungsfestigkeit beträgt 5000 V und mir ist kein Fall bekannt wo ein RG-213 Kabel einmal durchgeschlagen hätte.

Das nachstehende Bild gibt einen Überblick über die verschiedenen Koaxialkabeltypen:



[D] = Normales Koaxialkabel

[E] = Doppelt geschirmtes Koaxialkabel
mit 2 voneinander isolierten Abschirmungen. Trifft man eher selten an. Eignet sich gut zur Anfertigung von koaxialen Dipolen.

[F] = Hardline
[G] = Heliax

Dies sind Koaxialkabel wie sie vor allem von Kabelfernsehgesellschaften verwendet werden. Trotzdem solche Kabel üblicherweise eine Impedanz von 75 Ω aufweisen lassen sie sich natürlich auch für KW verwenden. Diese Kabeltypen wiesen ganz tiefe Dämpfungswerte auf. Das Kabel lässt sich zwar nur in grossen Radien biegen. Es ist aber ein prima Kabel für lange Leitungen.

Einige Bemerkungen und Erläuterungen zum Thema Koaxialkabel:

Normales Koaxialkabel

Dies ist das Kabel das wir uns gewöhnt sind. Es besteht aus einer Seele, einem festen Dielektrikum und einer geflochtenen Abschirmung.

Im Amateurfunk ist eine Kabel-Impedanz von 50 Ω gewissermassen zum Standard erklärt worden. Es gibt allerdings auch Koaxialkabel mit anderen Impedanzwerten, z.B. 75 Ω . Dies ist in der Kabelfernsehtechnik der Standard. Auch gibt es Kabel mit so exotischen Werten wie 93 Ω . Diese werden in gewissen Computer-Netzwerken verwendet. Es ist ohne weiteres möglich solche Kabel auch für Amateurfunkzwecke zu verwenden. Meistens benötigt man dann allerdings einen Antennenkoppler um die Senderendstufe an das Kabel (und an die Antenne) anzupassen.

Eine weitere Eigenschaft der ganz normalen Koaxialkabel ist die Tatsache, dass diese Kabel niemals ganz dicht sind. Damit ist nicht „wasserdicht“ gemeint sondern „HF-dicht“. Wenn man grössere Kabellängen zwischen Shack und Antenne hat, dann kann man einmal folgenden Versuch machen. Man hänge das Kabel von der Antenne ab. Man lasse das Kabel offen oder hänge am antennenseitigen Ende eine Dummy-Load dran. Dann höre man mal im Shack was der Empfänger noch so an Signal reinbringt. Man wird erstaunt sein was man noch so alles durch das Koaxialkabel hindurch hört. Eine Antenne kann dann eine noch so schöne Richtwirkung haben, wenn das Koaxialkabel HF durchlässt hat man plötzlich wieder „Rundumempfang“.

Doppelt geschirmtes Koaxialkabel

Das unter e) gezeigte doppelt geschirmte Koaxialkabel ist ein absoluter Exot. Es handelt sich nämlich um ein echtes doppelt geschirmtes Kabel das über 2 voneinander unabhängige Abschirmungen verfügt. Die wenigsten OM's werden ein solches Kabel je zu Gesicht bekommen. Ich selbst besitze eine Rolle solchen Kabels das aus Beständen einer Firma stammt die sich mit Kryptographie befasst. Vermutlich wurde solches Kabel dort eingesetzt um die Abhörsicherheit zu erhöhen. Wenn man nämlich die Seele und den inneren Abschirm-Mantel floatend zur Signalübertragung verwendet und den äusseren Abschirm-Mantel erdet dann dürfte es kaum mehr möglich sein die im Innern des Kabels laufenden Signale abzuhören. Diese Art Koax-Kabel hat in der Amateurfunktechnik keine Bedeutung. Wenn solches Kabel vorhanden ist, dann eignet es sich gut zur Anfertigung von Sperrtopfanten. Diese Dinger werden auch koaxiale Dipole genannt und sind Englischen Sprachgebrauch als „Sleeve Antenna“ bekannt.

In der Kabelfernsehtechnik werden immer wieder „doppelt geschirmte“ Koaxialkabel angeboten. Man lasse sich nicht täuschen. Der Begriff ist eine Irreführung. Es handelt sich lediglich um ein Kabel das als Abschirmung eine geschlossene Alu-Folie verwendet. Der Vorteil: Dank der geschlossenen Alu-Folie sind solche Kabel dicht, d.h. sie strahlen nicht. Siehe unten „Kabel aus der TV-Technik oder SAT-Technik“.

Hardline und Heliax

Dies sind professionelle Kabel aus der Kabelfernsehtechnik. Die Impedanz beträgt immer 75 Ω . Der Durchmesser solcher Kabel ist meistens „Daumendick“ oder grösser. Die Seele ist immer grosszügig bemessen und die Abschirmung besteht entweder aus einem geschlossenen Alu-Rohr oder aus einem gewellten Alu-Rohr (zwecks besserer Flexibilität). Wenn man Zugang zu solchen Kabeln hat dann sollte man sofort zugreifen. Da die Kabel für Kabel-TV-Netze ausgelegt sind, sind die Dämpfungswerte äusserst gering. Es ist etwa das feinste vom Feinen das man kriegen kann. Da die Kabel-TV-Netze üblicherweise alle ihre Zwischenverstärker über das Koaxialkabel speisen sind diese Kabel zur Übertragung grosser Ströme vorgesehen und entsprechend „dick“ dimensioniert. Sie eignen sich deshalb ausgezeichnet für Sendezwecke.

Viele OM's schrecken vor der Verwendung solcher Kabel zurück, denn

- Das Verlegen solcher Kabel ist etwas mühsam, sie sind starrig und die Mindestradien sind relativ gross.
- Die Impedanz beträgt 75Ω .
- Die Stecker werden als Problem betrachtet. Es gibt zwar für solche Kabel Stecker, aber es sind nicht die Stecker die wir uns gewohnt sind. Wenn man die Kabel, wie ursprünglich vorgesehen, für die Übertragung von TV Programmen verwendet, dann sind gute Stecker ein Muss. Wir reden aber hier von Kurzwelle (1.8 – 28 MHz). Hier sind die Dinge nicht so kritisch. Hier darf man sich auch mal etwas einfallen lassen. Wenn keine Stecker vorhanden sind, dann baut man sich halt einen Übergang aus Klemmen.

Wenn man Zugang zu Hardline oder Heliak hat, dann lohnt es sich bei langen Kabellängen (z.B. ab etwa 50 m) alleweil diese Kabel einzusetzen, denn die bedeutend geringeren Kabel-Verluste wiegen den Nachteil im „Handling“ und „Anschluss“ bei weitem auf.

Kabel aus der TV-Technik oder der SAT-Technik

Wie bereits angeführt werden in der Kabelfernsehtechnik immer wieder „doppelt geschirmte“ Koaxialkabel angeboten. Man lasse sich nicht täuschen. Der Begriff ist eine Irreführung. Es handelt sich lediglich um ein Kabel das als Abschirmung eine geschlossene Alu-Folie verwendet.

Die kleinen Dämpfungswerte und häufig auch der bescheidene Preis dieser Kabel reizen einem ab und zu es mal mit so einem Kabel zu versuchen. Wenn man den Aufbau dieser Kabel näher betrachtet, dann sieht man sofort warum sich diese Kabel nicht für Sendebetrieb eignen. Der Querschnitt der Seele ist mehr als bescheiden und die Abschirmung besteht aus einer dünnen Alu-Folie bei der aussen herum ein loses Geflecht aus dünnen Cu-Drähtchen angeordnet ist. Die Querschnitte sind ausreichend um bei SAT-Empfang die paar „mA“ zur Speisung des LNB's zu übertragen. Für einen Sendebetrieb sind sie nicht ausreichend (oder höchstens für QRP).

Der einzige Vorteil dieser Kabel ist die Tatsache, dass dank der geschlossenen Alu-Folie solche Kabel dicht sind, d.h. sie strahlen nicht und sie nehmen auch keine externen Signale auf. Der einzige Einsatzzweck für ein solches Kabel im Amateurfunk sehe ich dort wo es darum geht Empfangssignale so zu übertragen, dass keine unerwünschten Zusatzsignale durch den Mantel aufgenommen werden. Ein typischer Fall wäre der Anschluss einer Beverage Empfangsantenne. Diese Antennenart, die für „low-band DX'ing“ verwendet wird bringt schon per Definition bescheidene Signale (2 – 3 S-Stufen weniger als auf einer normalen Antenne). Die Antenne zeichnet sich aber durch sehr gute Richtwirkung und Unterdrückung von Steilstrahlsignalen aus. Diese guten Eigenschaften sollten nicht durch „durchlässige“ Koax-Kabel zwischen Antenne und Shack verschlechtert werden.

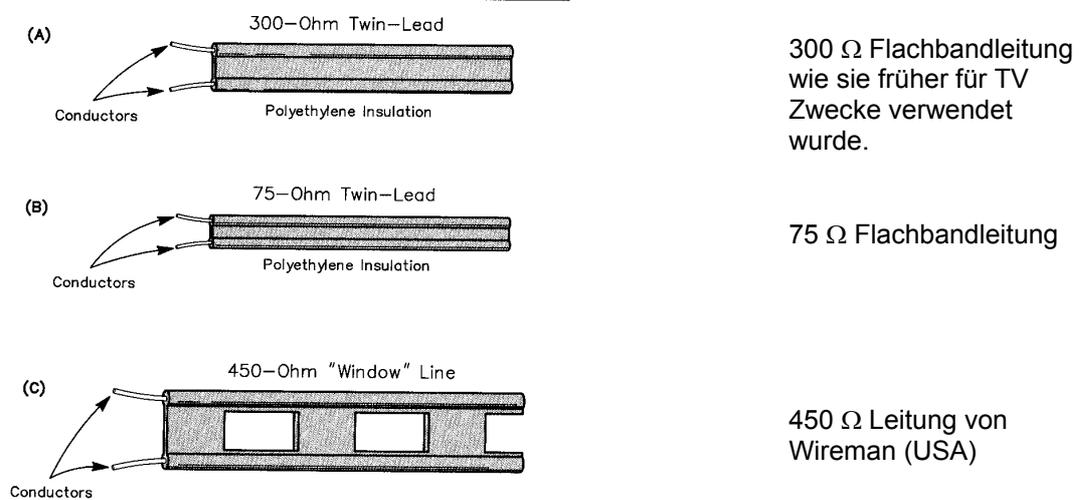
2.1.2 symmetrische Speiseleitungen

Ausser Koaxialkabeln verwendet man in der Kurzwellentechnik auch noch symmetrische Speiseleitungen. Diese sind von der guten alten Telefonfreileitung abgeleitet, die man ja scherzhaft als „600 Ω “ bezeichnet. Diese Bezeichnung ist technisch sogar korrekt, die Telefon-Freileitung weist tatsächlich eine Impedanz von ca. 600 Ω auf. Symmetrische Speisekabel haben den Vorteil, dass sie nahezu verlustfrei arbeiten und das auf der Leitung herrschende SWR ohne negative Auswirkungen irgendwelche Werte annehmen darf.

Rund um die Antenne

Teil 2: Speisekabel, SWR

Das nachstehende Bild zeigt die verschiedenen Typen von symmetrischen Speiseleitungen:



Wie sieht das heute aus:

- **300 Ω Flachbandleitung**

Diese Leitung ist heute praktisch nicht mehr auffindbar. Wenn noch irgendwo Restposten auftauchen, dann liegt das Herstellungsdatum meistens so weit zurück, dass man solche Leitungen mit Vorsicht geniessen muss. Dieser Typ Leitung ist nur sehr bedingt wetterfest, Nach einigen Jahren steigen die Verluste stark an und das Kabel muss ausgetauscht werden.

- **75 Ω Flachbandleitung**

soll es zwar geben, ich selbst bin diesem Leitungstyp noch nie begegnet. Was ebenfalls eine Impedanz in der Grössenordnung von 75 Ω aufweist ist ganz gewöhnliches **Lautsprecherkabel** oder die gute alte verdrillte Lampenschnur. Ich selbst habe schon, als nichts besseres vorhanden war, Lautsprecherkabel als Speiseleitung verwendet und zwar für 80 m und 40 m Betrieb. Bei nicht allzu langer Speiseleitung darf man Lautsprecherkabel wohl auch noch auf 10 MHz verwenden. Auf den höheren Bändern steigen allerdings die Verluste dann stark an, sodass eher davon abzuraten ist. Lautsprecherkabel ist zwar nicht als HF Speiseleitung konzipiert, aber zur Not geht's.

- **450 Ω Leitung von Wireman (USA)**

ist ein echtes HF-Kabel. Es ist wohl das populärste symmetrische Speisekabel. Dank den Fenstern die aus dem Kabel herausgeschnitten sind werden die dielektrischen Verluste vermindert und das Kabel ist nahezu verlustlos und auch hinreichend wetterfest.

Eine Alternative zu den oben gezeigt käuflichen symmetrischen Speiseleitungen stellt der Selbstbau einer 600 Ω Hühnerleiter dar. Man führt dabei 2 Drähte in einem Abstand von ca. 10 cm parallel. In Abständen von 1.5 – 2 m fügt man Abstandshalter aus Kunststoff ein (wohl dem der noch keramische Abstandshalter findet). Die Impedanz liegt dann irgendwo in der Gegend von 450 – 600 Ω .

Symmetrische Speiseleitungen stellen gewisse Anforderung beim Verlegen. Es sind nur grosse Radien zulässig und man sollte Wänden und irgendwelchen Leitungen oder Metallteilen nicht zu nahe kommen.

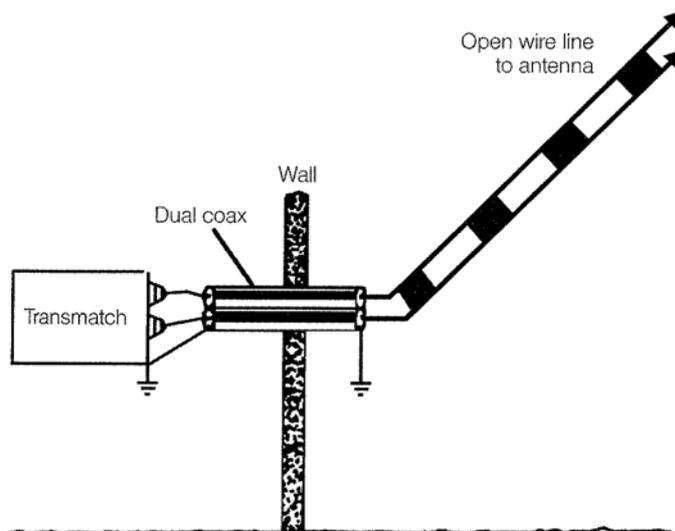


2.1.2.1 Hauseinführungen bei symmetrischen Leitungen

Ein weiterer kritischer Punkt der viele OM's von der Verwendung symmetrischer Speiseleitungen abhält ist die Einführung ins Haus. Mit unseren heutigen in Europa gebräuchlichen Fenstern die gut schliessen kann man nicht mehr einfach die Leitung zwischen Fenster und Fensterrahmen einklemmen. Es gibt aber mehrere Methoden dieses Problem zu lösen:

Wenn man einen speziellen Antennenkoppler für symmetrische Speiseleitungen besitzt und man deshalb mit der symmetrischen Leitung bis in den Shack gehen will, dann gibt es einen uralten und wahrscheinlich deswegen in Vergessenheit geratenen Trick.

Um eine Hauseinführung zu machen verwendet man 2 absolut gleich lange Stücke eines Koaxial-Kabels. Die Kabelimpedanz ist dabei nebensächlich. Wichtig ist, dass die Kabel vom gleichen Typ sind und identisch lang sind. Die Kabel müssen bei Mauerdurchführungen auch nicht parallel verlegt werden. Man kann sie auf separaten Trassen verlegen. Der Anschluss erfolgt wie nachstehend gezeigt. Natürlich macht man denjenigen Teil der Leitung die aus Koaxial-Kabel besteht so kurz wie möglich, denn derjenige Teil der Leitung für die wir Koaxial-Kabel verwenden weist genau die gleichen Dämpfungswerte auf wie eine un-symmetrische Leitung aus Koaxial-Kabel unter denselben Betriebsbedingungen.



Eigentlich wären symmetrische Speisekabel eine ideale und nahezu verlustfreie Möglichkeit um Antennen zu speisen. Leider sind unsere heutigen Transceiver mit unsymmetrischen 50 Ω -Ausgängen versehen. Das bedeutet, dass man spezielle Antennenanpassgeräte benötigt die für symmetrische Speisekabel ausgelegt sind. Als weiter Erschwernis kommt hinzu, dass symmetrische Antennentuner über diverse Einstellorgane verfügen. Die optimale Abstimmung erfordert einige Erfahrung und Fingerspitzengefühl.

2.1.2.2 Übergang von symmetrischer Leitung auf Koax-Kabel

Man kann die ganze Sache auch noch von einer anderen Seite her betrachten.

Viele OM's besitzen Antennenkoppler in heute üblicher Bauart, z.B. unsymmetrische T-Koppler. Bei vielen, wenn nicht sogar bei den meisten dieser Koppler findet man auf der Rückseite zusätzlich noch Anschlüsse für eine symmetrische Speiseleitung. Der Übergang „unsymmetrisch auf symmetrisch“ findet im Innern des Antennenkopplers statt und zwar findet man dafür fast immer einen Balun mit einem Übersetzungsverhältnis 1:4 (im

Rund um die Antenne

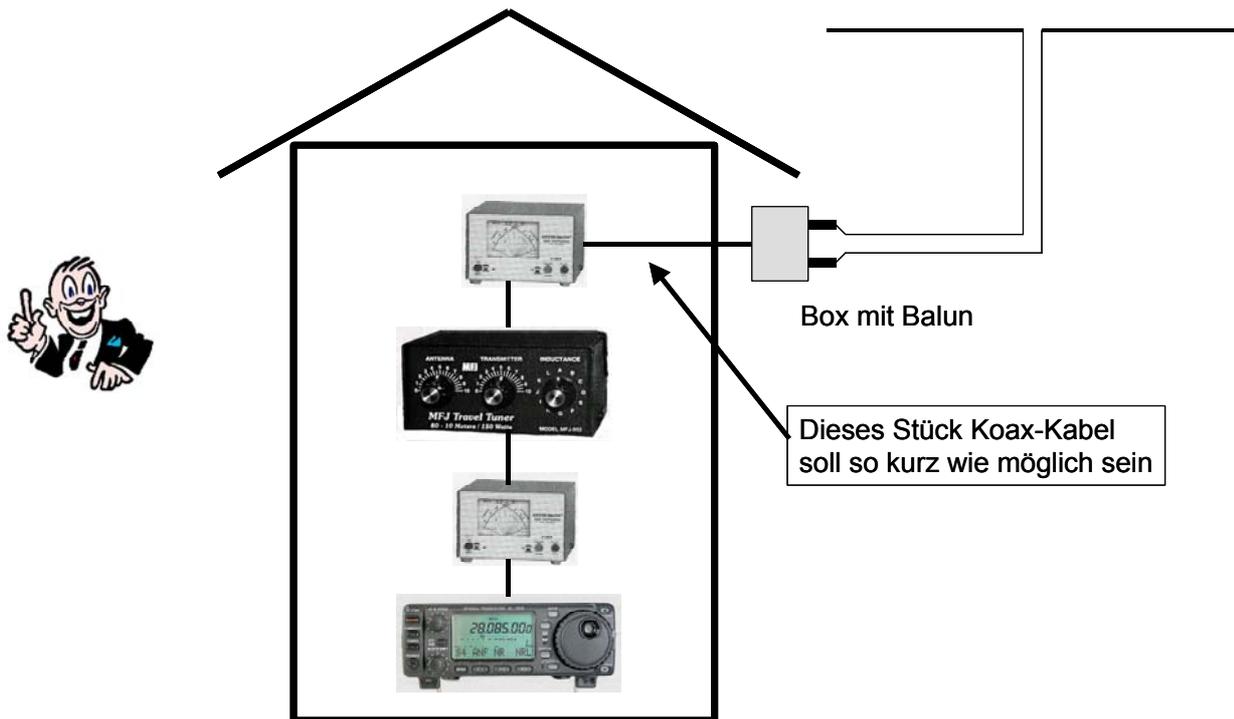
Teil 2: Speisekabel, SWR

Volksmund 50 Ω / 200 Ω). Nun kann man sich natürlich mit Recht fragen:

- Muss denn dieser Balun im Antennenkopplergehäuse drin sein ?
- Wäre es nicht denkbar diesen Balun extern zu platzieren ?

Dies ist eine gute Frage! Wer hindert uns denn, den Balun als separate Einheit anzusehen und den Balun dort zu platzieren wo er für uns günstig gelegen ist?

Diese Art der Einführung ins Haus sieht dann etwa so aus:



Wir haben also unseren Transceiver und einen Antennenkoppler. Zwischen den Antennenkoppler und den Transceiver schalten wir ein SWR Meter. Dieses kann im Transceiver oder auch im Antennenkoppler bereits integriert sein. Beim Antennenkoppler handelt es sich um einen ganz gewöhnlichen unsymmetrischen Antennenkoppler. Wir gehen nun vom Antennenkoppler mit Koax-Kabel weiter zur Box mit dem Balun. Zweckmässigerweise schalten wir auch in diese Leitung ein SWR Meter oder ein HF-Amperemeter (sofern man eines hat) ein. Dieses SWR Meter schalten wir auf Vorwärtsleistung, die Rückwärtsleistung interessiert uns nicht. Dieses SWR Meter dient lediglich dazu sicherzustellen, dass auf derjenigen Stellung des Antennenkopplers der uns beste Anpassung in Richtung Transceiver anzeigt auch tatsächlich die grösste Leistung auf die Antenne geht.

Warum dieses SWR Meter in der Antennenleitung?

Dies hat damit zu tun, dass man bei diversen Antennenkopplern mehrere Stellungen findet die eine optimale Abstimmung in Richtung Transceiver anzeigen. Aber nur eine dieser Stellungen liefert auch den maximalen Antennenstrom. Im Extremfall kann es sich sogar um eine sog. Kamikaze-Stellung handeln, bei der die gesamte Sendeenergie im Antennenkoppler drin in Wärme umgesetzt wird. Der Antennenkoppler gibt dann nach einiger Zeit „Rauchzeichen“ von sich und kann anschliessend entsorgt werden.

Das Koax-Kabel zwischen Antennenkoppler und der Balun-Box sollte man so kurz wie möglich halten. Man soll dies aber nicht zu eng sehen, 5 Meter oder 10 Meter sind OK. Man

muss sich einfach vor Augen halten, dass auf diesem Stück Koax-Kabel ein SWR auftritt das in den meisten Fällen für den Durchschnitts-OM erschreckend hoch ausfällt.

Was ist in der Balun-Box drin ?

Hier gibt es diverse Varianten:

- Ein klassischer Balun mit einem Übersetzungsverhältnis von 1:4
- Ein klassischer Balun mit einem Übersetzungsverhältnis von 1:1
- Eine Mantelwellensperre (entspricht in der Funktion einem Balun mit einem Übersetzungsverhältnis von 1:1)

Der Balun passt in diesem Falle nicht einen Dipol mit einer Impedanz von 50 .. 70 Ω an. Im Gegenteil, die Impedanzen am Ende der symmetrischen Speiseleitung können irgendwelche Werte annehmen. Das kann für den Balun einen schönen Stress bedeuten. Darum wählen wir zweckmässigerweise einen Balun der für eine höhere Leistung als für unsere normale Sendeleistung ausgelegt ist. Damit ist sichergestellt, dass die Kerne im Balun nicht sofort in die Sättigung gehen. Also den Balun immer 1 – 2 Nummern grösser wählen.

Welche Art Balun ist am geeignetsten?

Diese Frage ist nicht einfach zu beantworten. Je nach Auslegung der Antennenanlage und der Länge der symmetrischen Speiseleitung kann ein 1:1 Balun oder ein 1:4 Balun bei der Abstimmung am Antennenkoppler die besseren Ergebnisse bringen.

Kürzlich las ich eine Abhandlung zum Thema „Balun“ die von DX Engineering, einem bekannten Hersteller von Baluns, Ununs etc. aus den USA verfasst wurde. Dort kam man zum Schluss, dass beim Übergang von symmetrisch auf unsymmetrisch mit Vorteil ein 1:1 Balun oder eine gute Mantelwellensperre eingesetzt wird. Gerade bei tiefen Impedanzwerten wirke sich die Impedanztransformation um den Faktor 4 des 1:4 Baluns äusserst unvorteilhaft aus. Man kommt dann beim Antennenkoppler leicht in einen sehr niederohmigen Bereich wo die Antennenkopplerverluste doch recht beträchtliche Werte annehmen können. Interessant ist, dass diese Aussage mit meiner eigenen praktischen Erfahrung übereinstimmt. Schon diverse Male, als bei solchen Antennenaufbauten jeweils sowohl ein 1:1 Balun und ein 1:4 Balun zur Verfügung standen kam ich jeweils nach dem testen beider Versionen zum Schluss, dass der 1:1 Balun geeigneter ist. Mit dem 1:1 Balun war die Abstimmung einfacher und der bei gleicher Senderausgangsleistung auf dem Antennenkabel gemessene Strom (oder Vorwärtsleistung) war etwas höher. Die Begründung von DX Engineering leuchtet mir deshalb ein.

Seit es die guten Mantelwellensperren auf der Basis von Ferritkernen, die über den Mantel des Koax-Kabels aufgereiht werden, gibt neige ich persönlich zur Ansicht, dass dies die optimale Lösung dieses Anpassproblems darstellt.

Noch ein Tipp aus der Praxis:

- Versucht's mit dem was ihr habt. Wenn's i.O. geht, dann ist's prima.
- Wenn's gar nicht gehen will, dann versucht man's halt mit einer anderen Version.

Mehr zum Thema „Baluns“ findet sich in Teil 3 „Antennenkoppler, SWR-Meter, Messgeräte, Baluns“

2.1.3 Kabelverluste

Dass Speisekabel Verluste aufweisen ist jedermann bekannt. Kein Kabel arbeitet verlustfrei. Bei HF Leitungen unterscheidet man

- **Kupferverluste**
Diese sind bei den üblichen RG-58 und RG-213 praktisch vernachlässigbar. Wenn man jedoch dünnere Koaxialkabel verwendet und etwas Leistung drauf gibt, dann kann man feststellen, dass das Kabel warm wird. Das sind dann echte Kupferverluste.
- **Dielektrische Verluste**
Diese stellen den Hauptteil der Verluste dar.

Was passiert eigentlich mit den Verlusten. Diese verschwinden nicht in irgendeinem Nirwana, sie werden gemäss den Gesetzen der Physik umgewandelt und zwar in Wärme.



Die Verlustenergie wird verheizt.

Eine weitere Frage die sich immer wieder stellt:

Warum nehmen Kabelverluste zu bei ...

- **hohem SWR**
Ein Teil der Energie wird am Speisepunkt der Antenne reflektiert und pendelt zwischen Antenne und PA hin und her. Jedesmal treten beim reflektierten Energieanteil die Verluste wieder von neuem auf.
- **zunehmender Frequenz**
Die folgende Erklärung ist zwar wissenschaftlich nicht einwandfrei und stark vereinfacht:

Das Dielektrikum ist nicht ein perfekter Isolator. Es wirkt wie eine Kette von Kondensatoren deren Impedanz bei zunehmender Frequenz immer kleiner wird. Die Leckströme nehmen mit der Frequenz zu.

Man kann sich das etwa so vorstellen:

Bei jedem Wellenzug wird eine gewisse Energiemenge als dielektrischer Verlust verbraten. Je schneller sich die Wellenzüge folgen (= höhere Frequenz) um so mehr Energie geht verloren. Auch die dielektrischen Verluste werden in Wärme umgewandelt, sie wärmen das Dielektrikum auf.

Die nachstehende Tabelle soll dieses Thema relativieren:

Kabelverluste in der Praxis:
in dB/100 ft (ca. 30 m)

pro Memoria: **1 S-Stufe = 6 dB**

Band	RG-58	RG-213	Wireman 450 Ω (Flachbandleitung)
160 m	0.55 dB	0.25 dB	< 0.1 dB
80 m	0.70 dB	0.38 dB	< 0.1 dB
40 m	1.00 dB	0.55 dB	< 0.1 dB
20 m	1.50 dB	0.80 dB	0.1 dB
15 m	2.00 dB	1.00 dB	0.13 dB
10 m	2.50 dB	1.30 dB	0.15 dB

2.1.4 Elektrische Belastung eines Koaxial-Kabels

Bei diesem Thema stehen 2 verschiedene Betrachtungen an:

- Die thermische Belastbarkeit
- Die Spannungsmässige Belastbarkeit

2.1.4.1 Die thermische Belastbarkeit eines Koaxial-Kabels

Die thermische Belastbarkeit ergibt sich aus dem Strom der fliesst.

Bei 50 Ω , d.h. bei SWR 1:1 finden wir folgende Werte:

$$\begin{array}{lll} P = 100 \text{ W} \rightarrow & U = 71 \text{ V} & I = 1.42 \text{ A} \\ P = 1000 \text{ W} \rightarrow & U = 225 \text{ V} & I = 4.48 \text{ A} \end{array}$$

Aus den Koaxial-Kabel Tabellen entnehmen wir:

RG 58 \rightarrow	Spannungsfestigkeit = 1900 V	Leiterquerschnitt = 0.5 mm ²
RG 213 \rightarrow	Spannungsfestigkeit = 5000 V ...	Leiterquerschnitt = 3.2 mm ²

Im Elektromaschinenbau rechnet man für Drähte die irgendwo eingelegt sind und deshalb die Wärme nicht so gut ableiten können, z.B. Trafowicklungen und Motorwicklungen, mit einer zulässigen Stromdichte von ca. 4 A/mm².

Aus diesen Angaben sieht man:

RG58 ist für Leistungen bis 100 W zulässig, für höhere Leistungen sollte man unbedingt auf eine „dickeres“ Kabel, z.B. RG 213 übergehen um auf der sicheren Seite zu sein. Wir wissen ja vom Löten, dass das Dielektrikum des Koaxial-Kabels wärmeempfindlich ist. Das letzte was wir wollen ist ein warmes Kabel dessen Dielektrikum langsam davonfliesst.

2.1.4.2 Die spannungsmässige Belastbarkeit eines Koaxial-Kabels

Sobald auf einer Antennenzuleitung „SWR“ auftritt läuten bei vielen OM's die Alarmglocken. Man hat schon davon gehört, dass bei „SWR“ plötzlich hohe Spannungen auf dem Koaxial-Kabel auftreten kann. Man fürchtet, dass bei höheren SWR-Werten das Koaxial-Kabel durchschlagen und kaputt gehen könnten.

Wie sieht die Wahrheit aus ?

Es gilt folgende Formel:
$$U_{(\text{Koax})} = U_{(50\Omega)} * \sqrt{\text{SWR}}$$

In Worten ausgedrückt bedeutet dies:
Die Spannung auf dem Koaxial-Kabel steigt lediglich mit der Quadratwurzel des SWR an.

Für ein 50 Ω Koaxial-Kabel bedeutet dies:

Bei P = 100 W und	SWR 1:1 \rightarrow U = 71 V	SWR 1:10 \rightarrow U = 225 V
Bei P = 1000 W und	SWR 1:1 \rightarrow U = 224 V	SWR 1:10 \rightarrow U = 708 V

Die U_{max} für RG-58 beträgt 1900 V und für RG-213 sogar 5000 V. Man sieht daraus:
Selbst bei „maximum legal power“ = 1000 W besteht nie die Gefahr, dass ein Koaxial-Kabel durchschlägt. Seid mutig, habt weniger Angst vor dem bösen SWR.



2.1.5 Verkürzungsfaktor

Wie wir alle wissen breiten sich elektromagnetische Wellen mit Lichtgeschwindigkeit aus. Pro Memoria: Die Lichtgeschwindigkeit beträgt 300'000'000 m/s = 300'00 km/s.

Dieser Wert gilt ausschliesslich für die Ausbreitung im freien Raum, also durch die Luft. Sobald sich Wellen in einem anderen Medium ausbreiten wird deren Geschwindigkeit gedämpft.

Der Faktor um wie viel sich die Geschwindigkeit gegenüber der Lichtgeschwindigkeit verringert bezeichnet man als Verkürzungsfaktor (v). Im englischen Sprachgebrauch spricht man von „Velocity Factor“ (VF). Diesen Ausdruck kann man am besten mit Geschwindigkeitsfaktor übersetzen.

Der Verkürzungsfaktor gilt bereits für simple Drahtantennen. Bei Kurzwellen Drahtantennen ist der Schlankheitsgrad, d.h. das Verhältnis zwischen Drahtdurchmesser und Wellenlänge sehr hoch und im allgemeinen rechnet man bei Kurzwellen Drahtantennen mit einem Verkürzungsfaktor von 0.98. Dies ist ein rein theoretischer Wert den man eigentlich gleich wieder vergessen sollte. Er liegt nämlich weit innerhalb des Toleranzbereiches den man durch „Umwelteinflüsse“ aller Art in der Praxis erhält.

Deshalb mein Rat bei der Bemessung von Antennedrähten:

- gerechnete Drahtlänge + 5 %, dies gibt auf jeden Fall eine Antenne deren Resonanzfrequenz etwas zu tief liegt.
- dann Resonanzfrequenz bestimmen.
- dann Drahtlänge so abschneiden, dass sich am aktuellen Standort die gewollte Resonanzfrequenz einstellt.

Der Grundgedanke dabei ist:

Abschneiden geht einfacher als ansetzen !

Ist ein Draht kein blanker Leiter sondern von einer Isolierschicht umgeben, dann liegt der Verkürzungsfaktor etwas tiefer. Das ergibt dann für eine Kurzwellen Drahtantenne aus isoliertem Draht einen Verkürzungsfaktor von vielleicht 0.97 oder 0.96. Also auch hier immer noch innerhalb der Bandbreite der Abweichungen die wir in der Praxis immer wieder erleben und die durch standortbedingte Umgebungseinflüsse erzeugt werden.

Etwas anders sieht es aus wenn wir ein Koaxial-Kabel betrachten. Dieses besteht aus einer Seele, einer Abschirmung und einem Dielektrikum als Isolation zwischen Seele und Abschirmung. Hier erhalten wir nun einen Verkürzungsfaktor den wir nicht mehr einfach ausser Acht lassen können.

Der genaue Wert des Verkürzungsfaktors ist vom verwendeten Kabeltyp abhängig. Die Werte liest man aus einer Tabelle ab, wie man sie z.B. im ARRL Antenna Book findet.

Die nachstehende Tabelle zeigt die Werte für die im Amateurfunk gebräuchlichen Koax-Kabel-Typen.

- VF = Verkürzungsfaktor in %
- pF per foot = Kapazität pro Fuss (= 0.3048 m). Diese Angabe ist nützlich wenn man aus Koax-Kabel einen Kondensator herstellen muss.
- OD = Aussendurchmesser in Inch (25.4 mm)

Rund um die Antenne
Teil 2: Speisekabel, SWR

Characteristics of Commonly Used Transmission Lines

Type of line	Z_0 Ohms	VF %	pF per foot	OD	Dielectric Material	Max. RMS Operating Volts
RG-6	75.0	75	18.6	0.266	Foam PE	—
RG-8X	52.0	75	26.0	0.242	Foam PE	—
RG-8	52.0	66	29.5	0.405	PE	4000
RG-8 foam	50.0	80	25.4	0.405	Foam PE	1500
RG-8A	52.0	66	29.5	0.405	PE	5000
RG-9	51.0	66	30.0	0.420	PE	4000
RG-9A	51.0	66	30.0	0.420	PE	4000
RG-9B	50.0	66	30.8	0.420	PE	5000
RG-11	75.0	66	20.6	0.405	PE	4000
RG-11 foam	75.0	80	16.9	0.405	Foam PE	1600
RG-11A	75.0	66	20.6	0.405	PE	5000
RG-12	75.0	66	20.6	0.475	PE	4000
RG-12A	75.0	66	20.6	0.475	PE	5000
RG-17	52.0	66	29.5	0.870	PE	11000
RG-17A	52.0	66	29.5	0.870	PE	11000
RG-55	53.5	66	28.5	0.216	PE	1900
RG-55A	50.0	66	30.8	0.216	PE	1900
RG-55B	53.5	66	28.5	0.216	PE	1900
RG-58	53.5	66	28.5	0.195	PE	1900
RG-58 foam	53.5	79	28.5	0.195	Foam PE	600
RG-58A	53.5	66	28.5	0.195	PE	1900
RG-58B	53.5	66	28.5	0.195	PE	1900
RG-58C	50.0	66	30.8	0.195	PE	1900
RG-59	73.0	66	21.0	0.242	PE	2300
RG-59 foam	75.0	79	16.9	0.242	Foam PE	800
RG-59A	73.0	66	21.0	0.242	PE	2300
RG-62	93.0	86	13.5	0.242	Air-spaced PE	750
RG-62 foam	95.0	79	13.4	0.242	Foam PE	700
RG-62A	93.0	86	13.5	0.242	Air-spaced PE	750
RG-62B	93.0	86	13.5	0.242	Air-spaced PE	750
RG-133A	95.0	66	16.2	0.405	PE	4000
RG-141	50.0	70	29.4	0.190	PTFE	1900
RG-141A	50.0	70	29.4	0.190	PTFE	1900
RG-142	50.0	70	29.4	0.206	PTFE	1900
RG-142A	50.0	70	29.4	0.206	PTFE	1900
RG-142B	50.0	70	29.4	0.195	PTFE	1900
RG-174	50.0	66	30.8	0.100	PE	1500
RG-213	50.0	66	30.8	0.405	PE	5000
RG-214*	50.0	66	30.8	0.425	PE	5000
RG-215	50.0	66	30.8	0.475	PE	5000
RG-216	75.0	66	20.6	0.425	PE	5000
RG-223*	50.0	66	30.8	0.212	PE	1900
9913 (Belden)*	50.0	89	24.0	0.405	Air-spaced PE	—
9914 (Belden)*	50.0	78	26.0	0.405	Foam PE	—

Der Verkürzungsfaktor kommt immer dann ins Spiel wenn wir ein Koax-Kabel für etwas anderes einsetzen als als reine Speiseleitung.

Koaxial-Kabel können in der Praxis noch diverse andere Einsatzmöglichkeiten haben als die Anwendung als reine Speiseleitung. Man kann sie als Impedanztransformatoren benutzen oder als Schwingkreise. Nur um einige bekannte Beispiele zu nennen:

- Eine Viertelwellen-Leitung nimmt bei der der Länge entsprechenden Wellenlänge eine Umkehr der Impedanz vor. Wenn wir an einem Ende hochohmig liegen, dann erhalten wir am anderen Ende niederohmig und umgekehrt. Davon kann man bei der Anpassung resonanter endgespeister Antennen Gebrauch machen.
- Eine Halbwellen-Leitung überträgt bei der der Länge entsprechenden Wellenlänge die Impedanz identisch von einem Ende zum andern. Davon kann man Gebrauch machen wenn man die Impedanz einer Antenne am Antennenfusspunkt messen will aber aus „technischen Gründen“ nicht mit dem Antenna-Analyzer zum Antennenfusspunkt gehen kann. Dann schliesst man provisorisch eine Halbwellen-Leitung an und misst die Impedanz ganz bequem am anderen Ende.

Es gibt noch diverse andere solcher Anwendungen.

2.1.6 Verlegung von Koaxial-Kabel

Koaxial-Kabel haben den Vorteil dass man sie leicht und einfach verlegen kann.

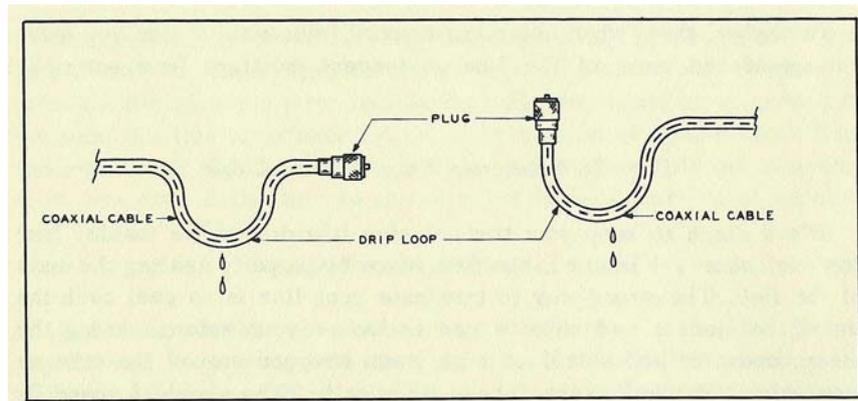
Trotzdem das Koaxial-Kabel pflegeleicht ist, alles lässt es sich nicht gefallen. Es ist empfehlenswert die folgenden Punkte zu beachten:



- Koaxial-Kabel grundsätzlich nicht spannen. Immer Zugentlastungen anbringen. Vor allem bei Steckern darf nicht der gesamte Zug auf den Stecker wirken. Am Anfang mag es zwar gut gehen, nach einiger Zeit rutschen aber sowohl die Seele wie auch der Mantel aus dem Stecker (siehe Kapitel 4.10 Zugentlastung)
- Bei Biegungen immer vernünftige Radien vorsehen. Vernünftig heisst hier „grosse Radien) Bei zu kleinen Radien besteht die Gefahr, dass sich in der Biegung die Seele in Richtung Mantel in Bewegung setzt und plötzlich einen Kurzschluss verursacht.
- Wenn ein Koaxial-Kabel in der Luft über eine längere Strecke geführt werden muss, dann empfiehlt es sich auf jeden Fall ein Halteseil (z.B. rostfreies Stahlseil) vorzusehen. Das Koaxial-Kabel wird dann in Abständen von max. 1 m am Halteseil befestigt. Dazu verwendet man am einfachsten schwarze Plastik-Kabelbinder.
- Bei Hauseinführungen und generell überall dort wo es einen Stecker hat sollte unbedingt eine Tropfnase (siehe unten) vorgesehen werden. Ein Koaxialkabel dessen Kunststoffmantel unbeschädigt ist ist grundsätzlich wasserdicht. Die Stecker selbst sind aber keineswegs wasserdicht. Wenn dort Feuchtigkeit eindringt, dann zieht es durch Kapillarwirkung die Feuchtigkeit ins Koaxial-Kabel ein. Man hat dann ein abgesoffenes Koaxial-Kabel, das höchstens noch als Dummy-Load zu Gebrauchen ist.

Rund um die Antenne

Teil 2: Speisekabel, SWR



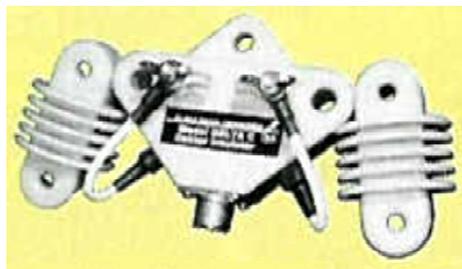
Übrigens:



- **Man hüte sich vor Winkelsteckern.**
Winkelstecker für Koaxial-Kabel sind eine praktische Sache. Die Qualitätsunterschiede sind aber gewaltig. Die Verbindung der Seele im Innern des Winkelsteckers ist häufig mit einer gebogenen Spiralfeder hergestellt. Dies wirkt wie eine kleine Induktivität. Der Abstand von der Abschirmung ist auch nicht überall gleich. Es besteht die Gefahr des Durchschlagens.
Bei Leistungen grösser als 100 W, → Hände weg von Winkelsteckern.

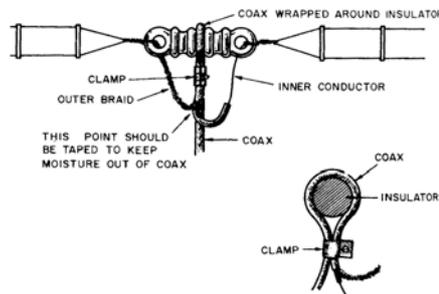
2.1.7 Anschluss des Speisekabels an die Antenne

Dies ist ein Punkt der manchem OM in der Praxis Kopfweh bereitet. Wie schliesse ich das Speisekabel an die Antenne an.



Eine Möglichkeit ist es ein kommerziell gefertigtes Dipolmittelstück zu verwenden.

Achtung:
Zugentlastung des Koax-Kabels nicht vergessen!



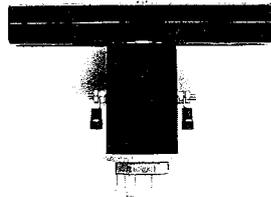
Eine andere, mehr „do-it-yourself“-Art des Anschlusses zeigt dieses Bild. Dies ist eine sehr einfache Art ein Koaxial-Kabel anzuschliessen, sogar das Problem der Zugentlastung ist einwandfrei gelöst. Allerdings ist diese Art nicht unbedingt wetterfest. Für eine Field-Day Antenne mag das gehen. Für permanenten Einsatz würde ich eher davon abraten.

Übrigens:

Das Koaxialkabel ist ein „niederohmiges“ Kabel das üblicherweise in einem Strombauch angeschlossen wird. Deshalb braucht es als Mittelisolator nicht einmal einen hochwertigen Isolator. Im Notfall tut's als Improvisation auch ein Stück Besenstiel.

Rund um die Antenne

Teil 2: Speisekabel, SWR



Dieses Dipolmittelstück besteht aus einem Kunststoffstück an dem die Dipolhälften befestigt werden und einer alten Filmdose als Wetterschutz für den Anschluss des Koaxialkabels. Auch hier: Zugentlastung des Kabels nicht vergessen.



Dieses Anschlussstück stammt aus meinen eigenen Beständen. Es ist für den Anschluss eines vertikalen Dipols vorgesehen. Man nehme:

- 1 wasserdichte Elektroverteildose aus dem Baumarkt.
- 2 Messingschrauben mit Flügelmuttern
- 1 Lüsterklemme
- etwas Kunststoffprofil

Das Problem der Zugentlastung und der horizontalen Wegführung des Koaxialkabels ist ebenfalls gelöst.

2.2 SWR & Cie.

SWR & Cie. ist für Funkamateure ein scheinbar endloses Thema. Vor mir haben schon viel berufener OM's versucht Licht in das SWR-Dunkel zu bringen. Meistens mit durchzogenem Erfolg.

König SWR hält Hof. Er befiehlt seinen gutgläubigen Untertanen kein SWR über 1:1 zuzulassen.



2.2.1 Allgemeine Bemerkungen zum Thema „SWR“

Ob King SWR mit seiner Behauptung nur ein SWR von 1:1 sei zulässig recht hat wollen wir im folgenden gemeinsam erarbeiten.



Im jetzigen Kapitel beschränken wir uns deshalb auf das wesentliche und zwar in Form einiger Fragen die immer wieder an die Oberfläche geschwemmt werden:

Was muss ich tun um bei meiner Antenne ein SWR von 1:1 zu erzielen ?

Um diese Frage beantworten zu können muss man sich zuerst mal vor Augen halten,

- dass wir als Speiseleitung üblicherweise ein Koaxial-Kabel mit einer Impedanz von 50Ω verwenden
und
- dass unsere Antennen selten eine Fusspunktimpedanz von genau 50Ω aufweisen.

Typische Fusspunktimpedanzen üblicher Antennen liegen bei Vorliegen von Resonanz in folgender Grössenordnung:

- Dipol $= 65 \Omega$
- Vertikalantenne $= 36.6 \Omega$
(Strahlerlänge $\lambda/4$ mit $\lambda/4$ Radials)

SWR auf der Speiseleitung tritt immer dann auf wenn die Antennen-Fusspunktimpedanz nicht mit der Impedanz der Speiseleitung übereinstimmt. Wir sehen bald, dass keine dieser Antennen ein SWR von 1:1 aufweisen kann. Wenn man den Dipol in der Form einer „Inverted Vee“ konstruiert, d.h. die Dipolhälften hängen nicht horizontal, sondern neigen sich leicht nach unten, dann kann man eventuell durch verändern des Steigungswinkels eine Anpassung des SWR gegen 1:1 hin erreichen. Wenn hingegen eine Vertikalantenne, eine sog. „Ground-Plane“, ein SWR von gegen 1:1 aufweist, dann freut sich zwar der eine oder andere OM an der Tip-Top abgeglichenen Antenne. Gewisse OM's freuen sich lange, andere OM's freuen sich nur so lange bis sie realisiert haben, dass die Differenz zwischen 36.6Ω und 50Ω (und das sind satte 13.4Ω oder 36%) aus Verlustwiderständen besteht. Wer verheizt schon gerne ein gutes Drittel der kostbaren Sendeenergie ?

Alles klar ?

Also, lieber eine optimale Antenne und ein gewisses Mass an SWR auf der Speiseleitung als eine „SWR 1:1 - Anpassung“ die dank der gütigen Mithilfe von Verlustwiderständen zustande gekommen ist.

Das SWR lässt sich ja immer noch mit einem Antennenkoppler kompensieren. Aber angepasst, auch Antennekoppler arbeiten nicht verlustfrei!

Kann man eine Antenne auch ausserhalb der Resonanzfrequenz benützen ?



Hier lautet die Antwort:

Im Prinzip ja, aber man lasse bitte den gesunden Menschenverstand walten.

Was meine ich damit ?

Von der Theorie her ist es so, dass sich jedes beliebige elektrisch leitende Objekt mittels einer geeigneten Anpassschaltung auf jede beliebige Frequenz abstimmen lässt.

Rund um die Antenne

Teil 2: Speisekabel, SWR

Die Frage dabei ist lediglich:

- Wie ist der Wirkungsgrad ?
- Wie ist die Abstrahlung ?
- Was passiert auf der Speiseleitung ?

Dies soll an 2 Praxisfällen erläutert werden:

- Ein Dipol der für das 80 m Band bemessen ist lässt sich mittels eines Antennenkopplers ohne weiteres über das ganze Band benutzen. Die SWR-Werte die auf dem Speisekabel auftreten sind so, dass sie vom Antennenkoppler ohne weiteres verarbeitet werden können.
- Ein Dipol der für das 10 m Band ausgelegt ist lässt sich theoretisch mittels einem geeigneten Antennenkoppler auf dem 160 m Band abstimmen. Der Wirkungsgrad dieser Antenne ist allerdings miserabel, da die Antenne viel zu kurz ist. Regel 3 die besagt „Strom strahlt“ ist hier nicht erfüllt, die Antenne besteht nur noch aus „Spannungsbäuchen“.

Welches SWR ist auf der Speiseleitung (Koaxial-Kabel) zulässig ?

Um diese Frage zu beantworten sind folgende beiden Fälle zu unterscheiden:

- **Ohne Antennenkoppler:**
Die meisten heutigen Transceiver akzeptieren ein SWR von max. 1:2 und liefern noch die volle Leistung. Bei höherem SWR regeln sie die Leistung zurück um die PA zu schützen. Hier ist die Limite ganz klar bei SWR 1:2.
- **Mit Antennekoppler:**
Durch Verwendung eines Antennekopplers machen wir die PA glauben es liege 50Ω an und die PA liefert die volle Leistung. Vom Antennenkoppler aus gesehen in Richtung Transceiver haben wir also ein SWR innerhalb 1:2. Vom Antennenkoppler aus in Richtung Antenne haben wir irgendein SWR.

Die Frage welches SWR auf dem Antennekabel zulässig ist hängt von verschiedenen Faktoren ab. Dabei ist die Kabellänge, die Frequenz und die Ausgangsleistung zu beachten.

- Lange Kabel bringen halt mehr Verluste als kurze Kabel
- Bei zunehmender Frequenz steigen die Verluste an
- Dicke Kabel haben im allgemeinen weniger Verluste als dünne Kabel.
- Bei Koaxial-Kabeln und hohem SWR wird die Spannungsfestigkeit des Kabels in der Praxis kaum je überschritten. Mir ist kein Fall bekannt indem je ein Speisekabel infolge hohen SWR's Schaden genommen hätte.

Diese Fragen werden in den kommenden Kapiteln ausführlich behandelt.

Wie verhalte ich mich persönlich?

Ich muss gestehen, ich gehe mit SWR relativ locker um. Auf den unteren Bändern (160 m – 80 m – 40 m) ist mir das SWR eigentlich egal solange die Antenne nach allen Regeln der Kunst gut strahlt. Was nützt mir das beste SWR wenn die Antenne nicht strahlt. Ein sehr gutes SWR erzielt man bekanntlich mit einer Dummy-Load (Kunstlast oder Kunstantenne). Es wurden zwar schon QSO's mit der Dummy-Load realisiert, deren Anzahl hält sich aber in Grenzen.

Viel wichtiger ist es, dass sich das SWR gegenüber dem Ursprungszustand nicht verändert. Das sind dann Anzeichen, dass irgendwo etwas nicht in Ordnung ist. Es empfiehlt sich des-

halb alle SWR Werte einer Antenne im Neuzustand zu notieren und von Zeit zu Zeit nachzumessen. Wenn sich die SWR Werte langsam aber sicher verändern, dann deutet dies auf irgendwelchen „Moder“ hin. Das können korrodierte Stecker sein oder ein Koaxialkabel das langsam aber sicher absäuft.

Im 160 m Band ist meine Antenne auf das CW Band ($f_{res} = 1830 \text{ kHz}$) abgeglichen. Wenn ich nun einmal auf 1991 kHz (der HB9-er SSB Frequenz) ein Schwätzchen halten will, dann kommt der Antennenkoppler zum Zug. Das SWR auf dem Speisekabel strebt dann zwar „gegen unendlich“. Die QSO Partner attestieren mir immer eine überdurchschnittliche Lautstärke und dem Koaxialkabel (RG-213) ist noch nie etwas passiert. Nur einmal, als ich die PA einschaltete, hat es bei $P_{max} = 1 \text{ kW}$ Spitze im Antennenkoppler drin einen „rüüdügen Chlapf“ gegeben und ein Schalter, der das Zusatz-L (die zusätzliche Spule die notwendig ist um überhaupt auf 160 m zu gelangen) einschaltet, hat sich mit Getöse verabschiedet. Aber das war allein mein Fehler. Da ich in meiner Bastelkiste den „richtigen“ Schalter nicht vorrätig hatte, habe ich halt den „zweitbesten“ eingebaut. Der ging zwar mit 100 W, aber bei 1 kW hat er sich nicht mehr so wohl gefühlt.

Man lernt halt immer etwas dazu !

Meine Empfehlung:

Nehmt das mit dem SWR nicht zu streng !

Ein guter Antennenkoppler hilft über vieles hinweg !

2.2.2 Die Antenne hat ein schlechtes SWR



Eine Antenne hat gar kein SWR !

Funkamateure sprechen immer davon, dass eine Antenne ein „schlechtes SWR“ habe.

Eine Antenne kann gar kein SWR haben. Eine Antenne hat eine Speisepunktimpedanz (auch Fusspunktimpedanz genannt).

Die Speisepunktimpedanz ist frequenzabhängig

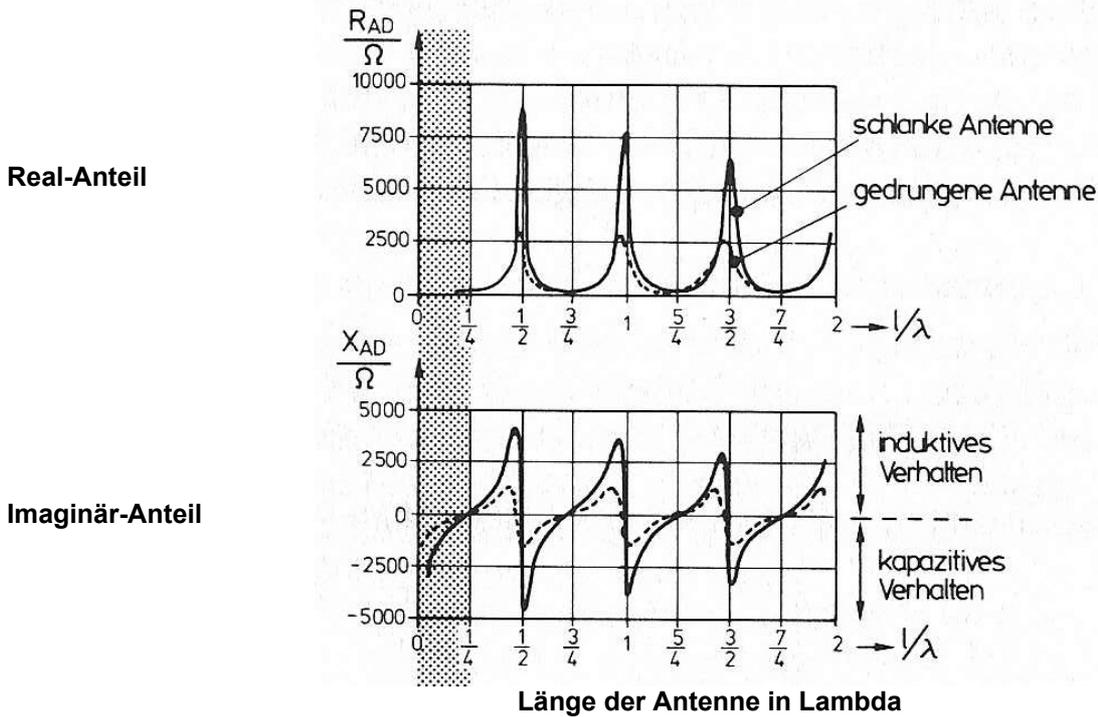
und setzt sich zusammen aus

Real-Anteil [R]

und

Imaginär-Anteil [+/- j]

Die nachstehende Grafik gibt einen Überblick über die Impedanzverhältnis einer Antennen in Funktion ihrer Länge in Lambda.



Warum reden wir denn vom „SWR einer Antenne“ ??

Die Antenne bzw. deren Speisepunktimpedanz ist zwar indirekt die Ursache für das Auftreten von $SWR > 1:1$, das SWR selbst ist aber ein Phänomen das nur und ausschliesslich auf dem Speisekabel auftritt.

2.2.3 Grundlagen zum Thema „SWR“

Leider kann man das Thema SWR nicht ohne ein Minimum an Theorie abhandeln.

Was ist eigentlich SWR ?

Die nachstehende Definition stammt aus Rothammels Antennenbuch:

Auf einer Leitung wird **grösstmögliche Leistung** nur dann übertragen, wenn der Scheinwiderstand des Generators (R_i) an den Scheinwiderstand des Verbrauchers (R_a) angepasst ist. Die der Energieübertragung dienende Speiseleitung muss ebenfalls der Anpassungsbedingung genügen. Ihr Wellenwiderstand Z muss gleich R_i und gleich R_a sein.

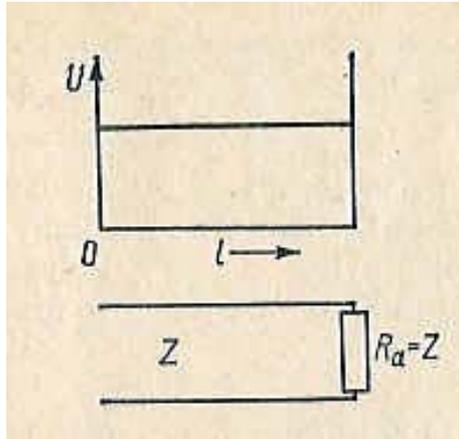
$$R_i = Z = R_a$$



Das Stehwellenverhältnis (SWR) ist ein Mass für die Welligkeit auf der Leitung. Es ist das Verhältnis der grössten Spannung auf einer Leitung zu deren kleinster Spannung.

$$S = \frac{U_{\max}}{U_{\min}}$$

$$S = \text{immer } \geq 1$$

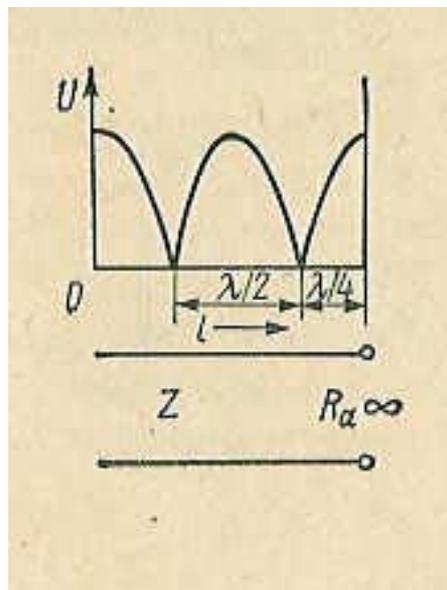


Sonderfall: angepasste Leitung

$$R_i = Z = R_a$$

Ist eine Leitung an ihrem Ende mit einem Lastwiderstand R_a abgeschlossen, der dem Wellenwiderstand Z entspricht, so wird die zum Abschlusswiderstand hin laufende Leistung in diesem restlos verbraucht. Dabei verteilt sich die Spannung und damit auch der Strom an allen Punkten der Leitung in gleichbleibender Grösse.

$$S = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = 1 \quad \text{da} \quad U_{\max} = U_{\min}$$



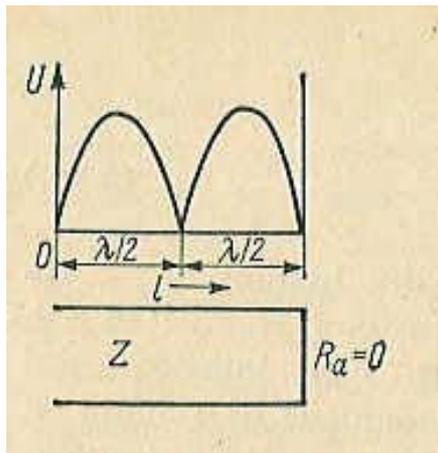
Sonderfall: offene Leitung

Entfernt man den Abschlusswiderstand, so stellt das offene Leitungsende für den Strom einen unendlich grossen Widerstand dar. Die vom Sender hinlaufende Welle findet keinen Verbraucher vor und wird deshalb wieder vollständig zu ihrem Ausgangspunkt reflektiert.

Wegen der endlichen Laufzeit überlagern sich hinlaufende und rücklaufende Wellen. Dadurch entstehen über die Länge l der Speiseleitung verteilt Spannungsmaxima und Spannungsminima, wobei am offenen Ende immer ein Spannungsmaximum vorhanden ist..

$$S = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \infty \quad \text{da} \quad U_{\min} = 0$$

(→ jede Division durch Null ergibt ∞)



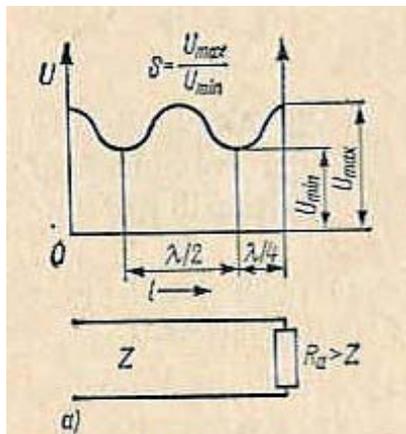
Sonderfall: kurzgeschlossene Leitung

Der andere Extremfall stellt die am Ende kurzgeschlossene Leitung dar. An einem Kurzschluss kann sich keine Spannung aufbauen.

Die vom Sender eintreffende Welle wird ebenfalls total reflektiert, allerdings mit einer Verschiebung um $\lambda/4$ gegenüber der offenen Leitung.

$S = \frac{U_{max}}{U_{min}} = \infty \quad \text{da} \quad U_{min} = 0$
--

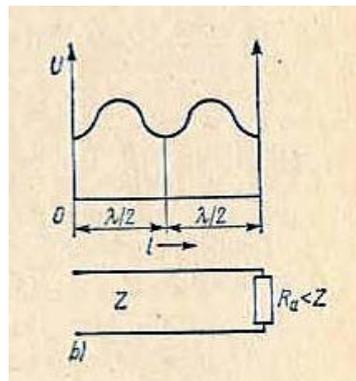
(→à jede Division durch Null ergibt ∞)



Der reale Fall: 0 ... Ra ... ∞

Ra > Z (hochohmige Antennen)

Die Spannung am Antennenfußpunkt ist grösser als die Durchschnittsspannung.



Der reale Fall: 0 ... Ra ... ∞

Ra < Z (niederohmige Antennen)

Die Spannung am Antennenfußpunkt ist kleiner als die Durchschnittsspannung.

2.2.4 Vorgehen wenn auf der Speiseleitung „SWR“ auftritt



- (1) **SWR bestimmen** (evtl. mit kleiner Leistung)
- (2) **Kabelverluste (dB) bestimmen**
(Kabeltyp, Kabellänge, Frequenz)
- (3) **Zusatzverluste (dB) durchs SWR bestimmen**
(siehe Tabelle)

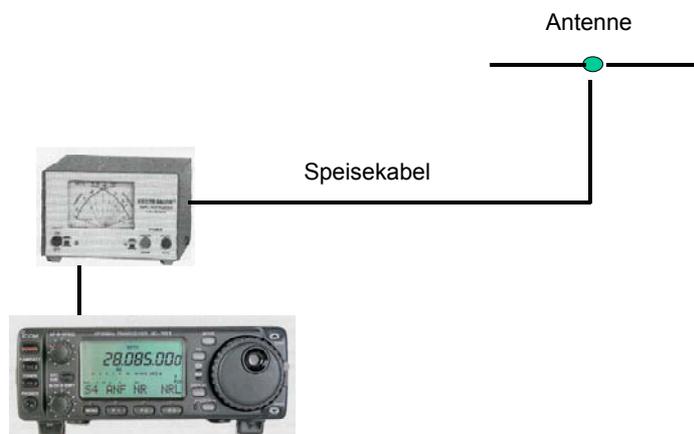
(siehe Tabelle)

(4) entscheiden ob man's wagt

(5) wenn JA → mittels Antennenkoppler TOTALREFLEXION herstellen

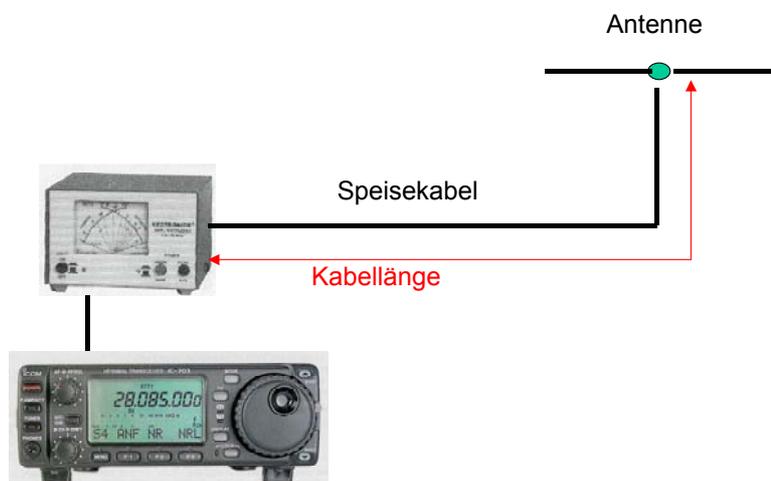
2.2.4.1 SWR bestimmen

Wir bestimmen zuerst einmal das SWR so wie es sich bei der in Frage stehenden Antenne im Shack präsentiert. Zweckmässigerweise verwenden wir dafür die kleinstmögliche Leistung die ein einwandfreies Resultat liefert. Wir notieren den gefundenen SWR Wert.



2.2.4.2 Kabelverluste bestimmen

Um die Kabelverluste bestimmen zu können benötigen wir die Länge des Speisekabels von der Antenne bis in den Shack. Mit diesem Wert gehen wir in die Tabelle mit den Kabeldämpfungswerten und bestimmen die Kabeldämpfung in dB und zwar für das verwendete Kabel und die entsprechenden Länge.



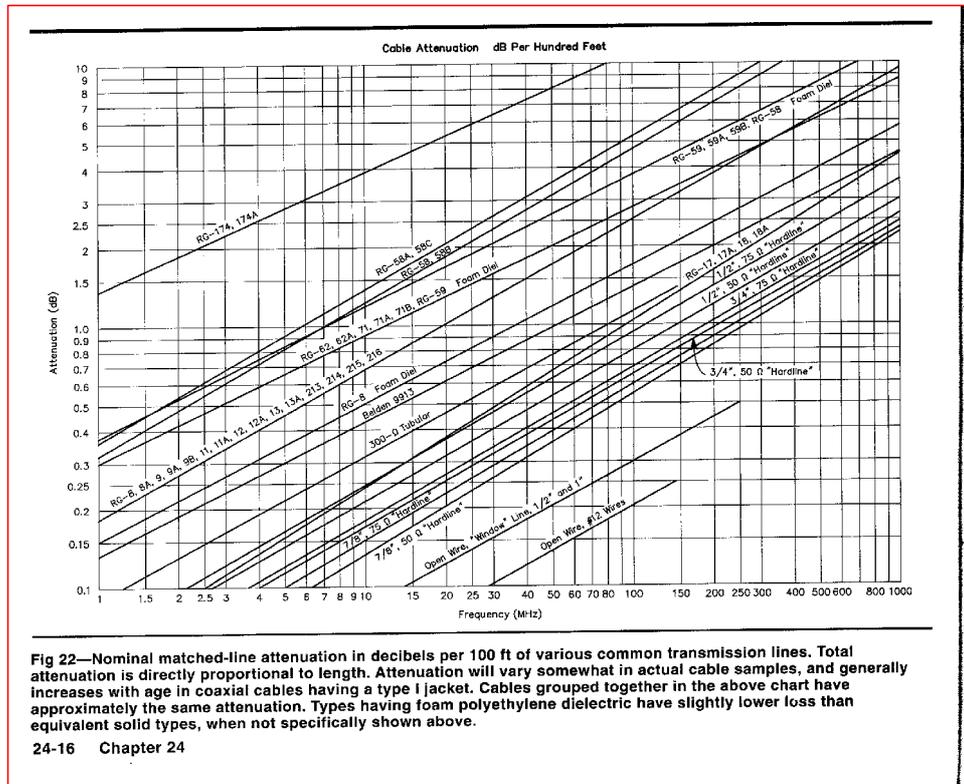
Rund um die Antenne

Teil 2: Speisekabel, SWR

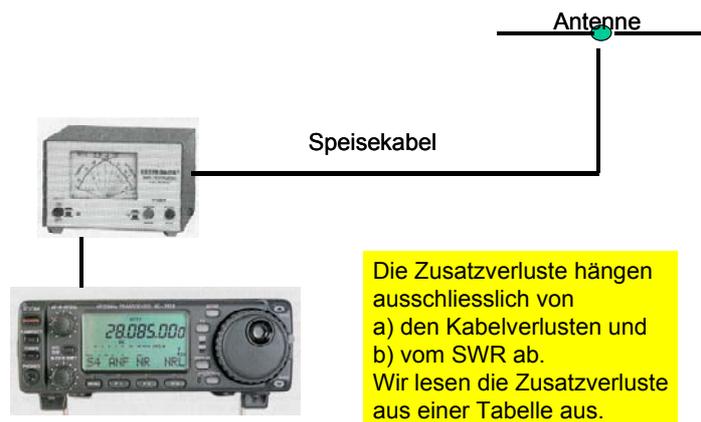
Pro Memoria:

So sieht die Tabelle mit den Kabeldämpfungswerten aus.

Alle Angaben verstehen sich in dB/100 ft (= dB pro 100 Fuss = ca. 30m)

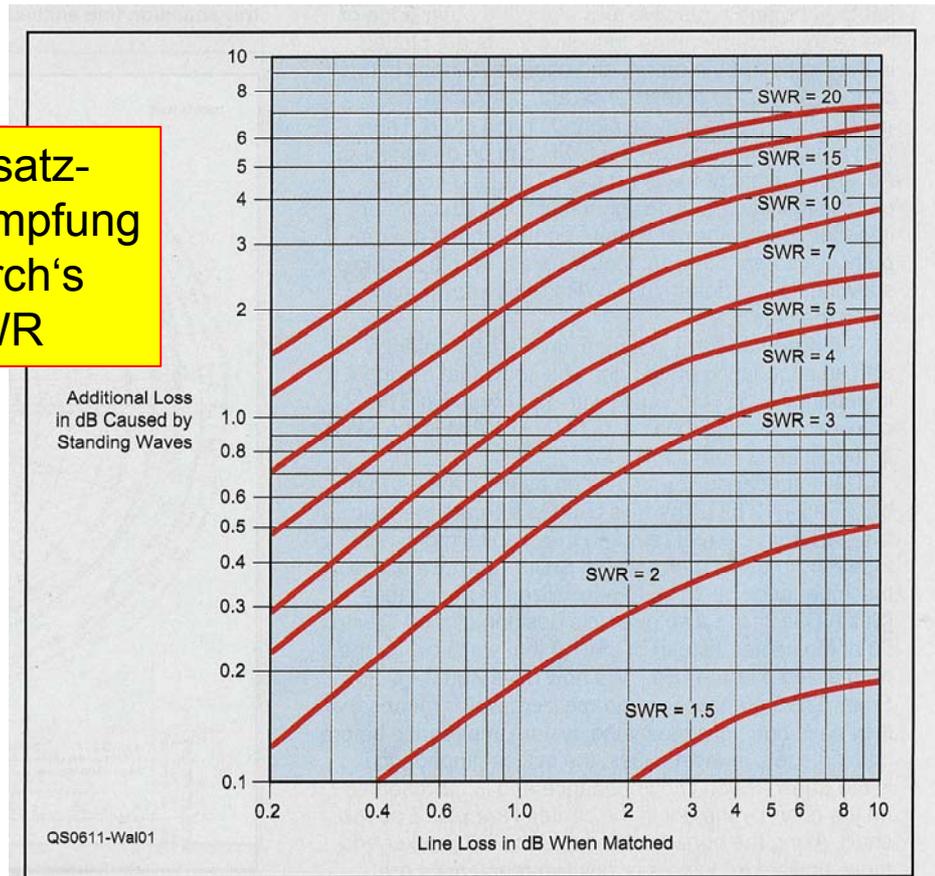


2.2.4.3 Zusatzverluste durch das SWR bestimmen



Die Zusatzverluste die durch das SWR verursacht werden hängen ausschliesslich von den Kabelverlusten (mit denen wir ohnehin leben müssen) und dem SWR ab. Die Zusatzverluste lesen wir aus der nachstehend gezeigten Tabelle ab.

Zusatz-
dämpfung
durch's
SWR



Kabelverluste

2.2.4.4 Entscheidung → wagt man's oder nicht ?

Nun kommt die eigentliche Kardinalfrage: wagt man's oder nicht ?

6 dB =
1 Stufe

Bei der Entscheidung sollten wir uns von der Überlegung leiten lassen, dass wir an der eigentlichen Kabeldämpfung ohnehin nichts ändern können, es sei denn wir würden ein besseres (= dämpfungsärmeres) Kabel verwenden.

Also müssen wir uns eigentlich nur noch mit der Frage der Zusatzdämpfung auseinandersetzen.

Auch hier sollte man immer daran denken → **6 dB = 1 S-Stufe !!!**

Ausser wenn man in einem riesigen Pile-up mitruft ist es kaum einmal vorgekommen, dass ein QSO nicht stattgefunden hat bloss weil die Feldstärke auf der Empfangsseite um 1 S-Stufe weniger war.

OHNE Antennentuner:

Die meisten heutigen Transceiver akzeptieren SWR 1:2 ohne die Leistung allzu viel zu reduzieren.

MIT Antennentuner:

Der Transceiver sieht 50 Ω und liefert die volle Leistung. Welches SWR in Richtung Antenne ist zulässig ?

Welches maximale SWR sollen wir akzeptieren ?

Auch das ist natürlich eine Frage deren Beantwortung jedem einzelnen überlassen bleibt.
Richtwerte sind:

Angsthasen:	max. SWR 1:3
Durchschnittsamateur:	ca. SWR 1:5
Mutige Typen:	bis SWR 1:10

2.2.4.5 Wenn ja, mittels Antennenkoppler Totalreflexion herstellen

Bei Vorhandensein von SWR auf dem Speisekabel ist es notwendig den

„conjugate match“,

auch **Totalreflexion** genannt, zu erzielen. Dies bedeutet, dass man die Reaktanzen des Antennensystems durch spiegelbildliche Reaktanzen kompensiert.

Dadurch erreicht man, dass die vom Antennenfußpunkt retournierte „Rückwärtsleistung“ im Antennenkoppler in Phase zur Eingangsleistung, die vom TX abgegeben wird, addiert wird.

Die „Vorwärtsleistung“ ist die Summe der Eingangsleistung und der „Rückwärtsleistung“.

$$P_{\text{forward}} = P_{\text{source}} + P_{\text{reflected}}$$

ACHTUNG:

Diese Bedingung gilt nur unter der Voraussetzung, dass mittels eines Antennenkopplers TOTALREFLEXION hergestellt wurde und so alle Reaktanzen des Antennensystems durch spiegelbildliche Reaktanzen kompensiert wurden.

Das nachstehende Bild zeigt die übliche Anordnung von

- Transceiver
- SWR Meter zwischen Transceiver und Antennenkoppler
- Antennenkoppler
- SWR Meter zwischen Antennenkoppler und Speiseleitung zur Antenne
- Speiseleitung mit angeschlossener Antenne

In den Köpfen von vielen Funkamateuren ist die irrige Meinung programmiert, wonach bei Vorhandensein von SWR auf der Speiseleitung die Rückwärtsleistung von der Vorwärtsleistung abgezogen würde und effektiv nur die Differenz zwischen Vorwärtsleistung und Rückwärtsleistung zur Antenne gelangen würde.

Wie bereits gesagt ist genau das Gegenteil richtig.

Die „Vorwärtsleistung“ ist die Summe der Eingangsleistung und der „Rückwärtsleistung“.

Rund um die Antenne

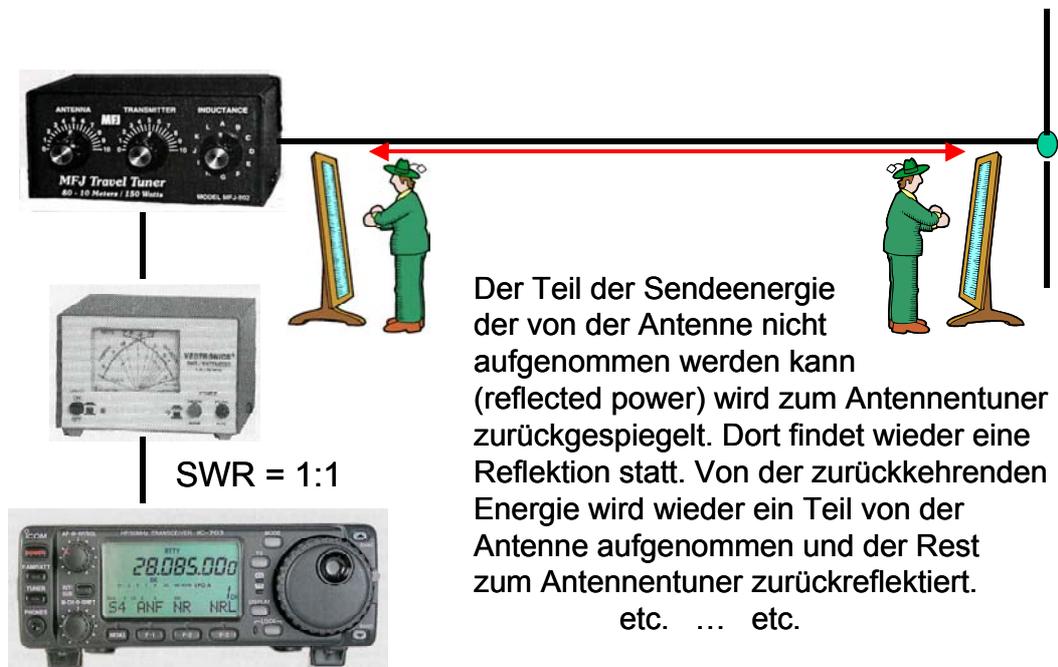
Teil 2: Speisekabel, SWR



Es ist unter gewissen Betriebsbedingungen bei Vorhandensein von SWR sogar möglich das Phänomen zu beobachten, dass das SWR-Meter am Eingang des Antennenkopplers die echte Leistung des Transceivers anzeigt, während das SWR-Meter im Antennenkabel eine höhere Vorwärtsleistung anzeigt als den Wert der effektiven Eingangsleistung in den Antennenkoppler.

Wären Antennenkoppler und Speiseleitung absolut verlustfrei würde dieses Phänomen bei Vorliegen von SWR und Totalreflexion immer auftreten. Wenn das beschriebene Phänomen in der Praxis auftritt, dann nur bei Verwendung eines guten und nahezu verlustfreien Antennenkopplers oder zu mindest bei einem Wert der Impedanztransformation bei dem der Koppler wenig Verluste aufweist.

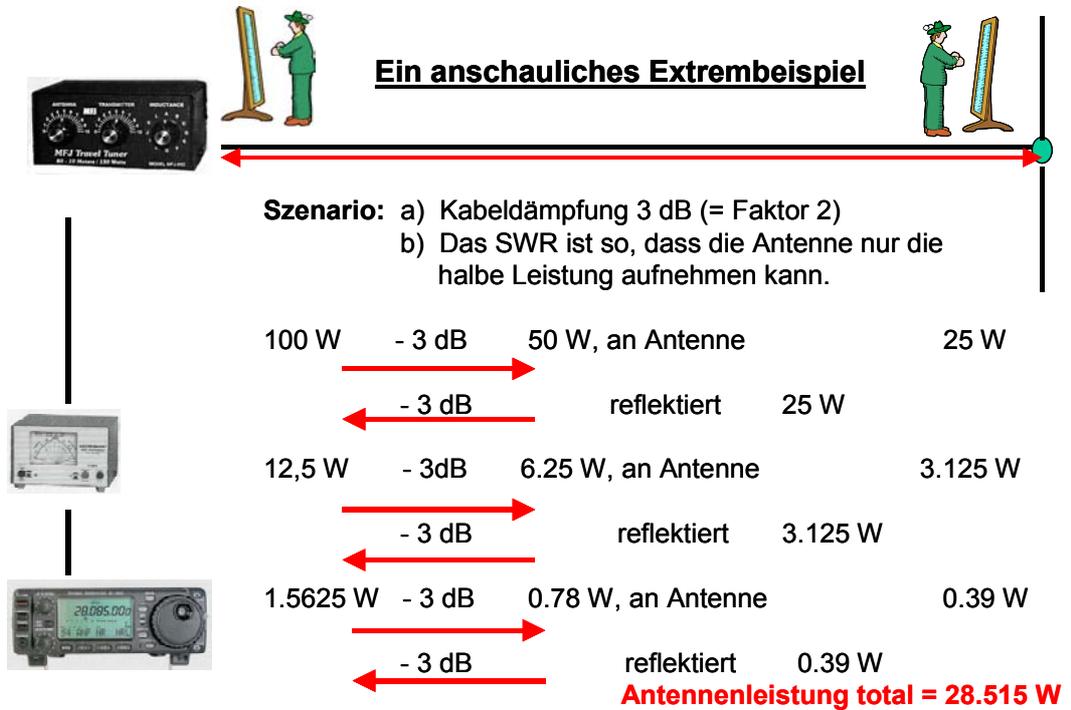
2.2.5 Was passiert bei der „Totalreflexion“



Rund um die Antenne

Teil 2: Speisekabel, SWR

Ein Extrembeispiel, das zwar nicht sonderlich praxisgerecht ist, sich aber einfach durchrechnen lässt, soll aufzeigen was beim hin- und herpendeln der Energie auf dem Speisekabel passiert und wie sich die Kabeldämpfung auswirkt.



2.2.6 SWR Verbesserung durch lange Speiseleitungen

Viele OM's haben schon von der wohltuenden Wirkung langer Speiseleitungen auf das SWR gehört. Wie man richtig vermutet hat dies etwas mit der Kabeldämpfung zu tun. Es stellt sich jetzt nur noch die Frage was das bedeutet. Ist das SWR das wir im Shack messen identisch mit dem SWR am Antennenfusspunkt ? Dies soll nachstehend beantwortet werden.

2.2.6.1 Welches ist das wahre SWR auf der Speiseleitung



Wie im obigen Bild erklärt ist das wahre SWR dasjenige das man am Antennenspeisepunkt messen würden wenn dieser für eine Messung zugänglich wäre. Dieses SWR ist und bleibt das einzig wahre SWR. Für die wenigsten OM's ist es allerdings möglich die Messung am Antennenspeisepunkt durchzuführen. Dieser Ort ist meistens oben irgendwo in der Höhe und nur in den seltensten Fällen zugänglich. Also beschränken wir uns in der Praxis fast immer darauf das SWR im Shack zu messen. Für die Praxis ist dies in den allermeisten Fällen auch ausreichend.

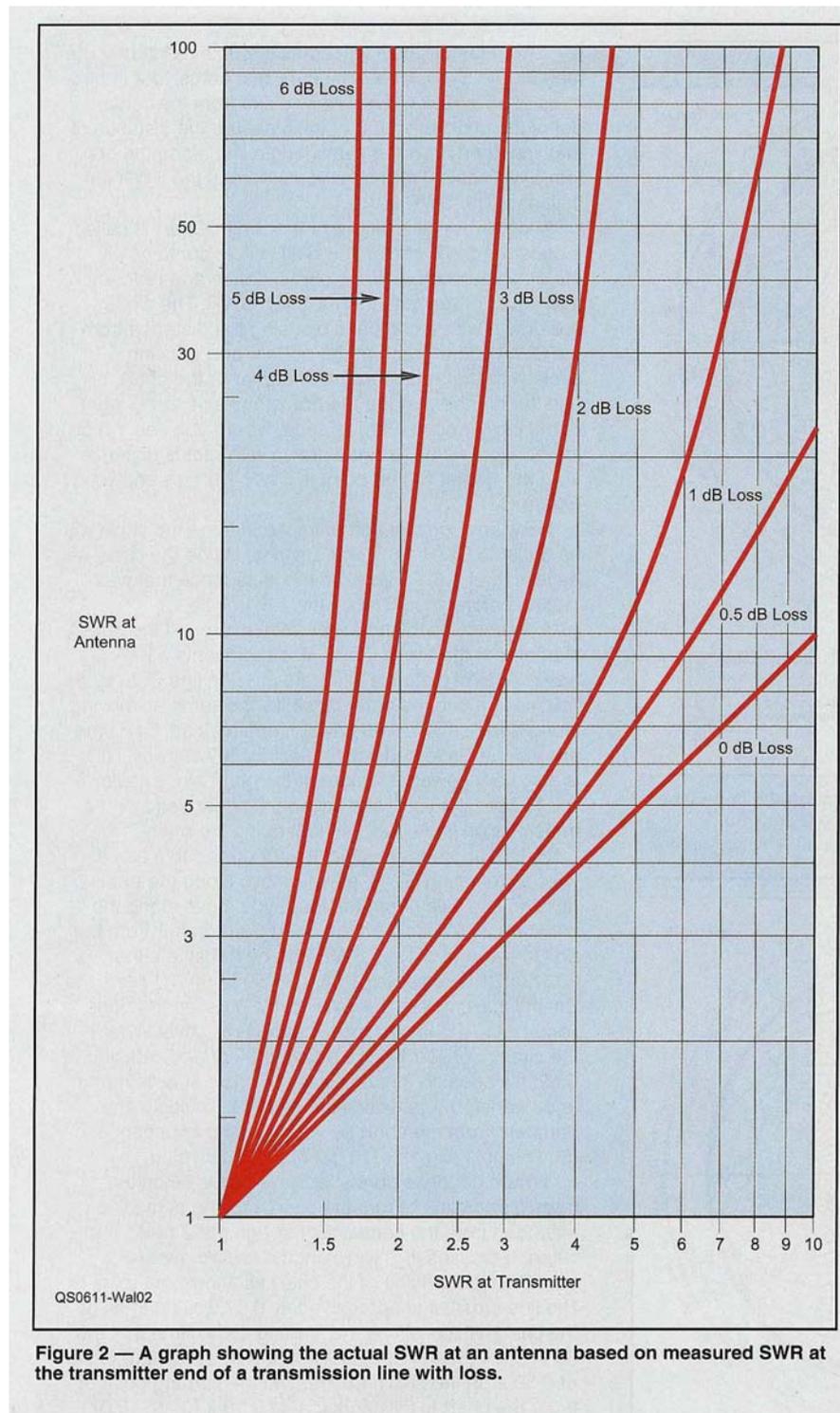
2.2.6.2 Berechnung des SWR am Antennenspeisepunkt

In gewissen Fällen mag es von Interesse sein das SWR am Antennenspeisepunkt zu kennen. Unter der Voraussetzung, dass die Kabeldämpfung auf dem Speisekabel zwischen Shack und Antenne bekannt ist kann auf Grund der Kabeldämpfung und des im Shack angezeigten SWR das SWR am Antennenspeisepunkt ausgerechnet werden.

Dazu verwendet man eine Tabelle die man in jedem guten Antennenbuch veröffentlicht findet. Man findet dort eine Kurvenschar für die verschiedenen „SWR im Shack“-Werte. Unten in der Tabelle findet man eine Skala bezeichnet „SWR at Transmitter“ (= SWR am Transceiver = im Shack gemessen). Auf der Skala links in der Graphik lesen wir das „echte“ SWR am Antennenspeisepunkt ab.

Rund um die Antenne

Teil 2: Speisekabel, SWR



Legende:

SWR at Transmitter	=	SWR am Transceiver (= im Shack)
SWR at Antenna	=	SWR am Antennenspeisepunkt
Kurvenschar	=	Kabeldämpfung in dB

2.2.6.3 Einfluss der Speisekabellänge auf das SWR

Es ist ein Phänomen das schon etliche OM's beobachtet haben. Wenn man die Länge des Speisekabel verändert (verkürzt oder verlängert) dann treten plötzlich Änderungen im Wert des SWR auf.

Grundsätzlich ist es so, dass auch bei Vorhandensein von $\text{SWR} \neq 1:1$ (d.h. ein SWR grösser als 1:1) das SWR Meter an jeder Stelle in der Speiseleitung eingeschlaucht werden kann und dass das angezeigte SWR überall gleich gross ist.



Wenn das Phänomen auftritt, dass sich mit der Änderung der Länge des Speisekabels das SWR verändert, dann ist dies ein Indikator dass Mantelwellen auf dem Speisekabel auftreten. Abhilfe schafft eine Mantelwellensperre angebracht am Antennenspeisepunkt.

Es soll allerdings nicht verschwiegen werden. Bei Speisekabeln gibt es Längen die tatsächlich zu einer Impedanztransformation führen. Das sind:

Kabellänge = $\frac{1}{2} \lambda$ (= 1/2 Wellenlänge elektrisch) oder Vielfache davon ergibt am Anfang und am Ende des Kabels identische Impedanzen.

Kabellänge = $\frac{1}{4} \lambda$ (= $\frac{1}{4}$ Wellenlänge elektrisch) oder ungerade Vielfache davon ergibt zwischen Anfang und Ende des Kabels eine Umkehr der Impedanz. Eine hochohmige Impedanz am Anfang des Kabels erscheint am Ende des Kabels als niederohmige Impedanz und umgekehrt.

ACHTUNG:

Kabel mit einer Kabellänge von genau $\frac{1}{4} \lambda$ oder $\frac{1}{2} \lambda$ weisen die oben beschriebenen Transformationseigenschaften natürlich nur bei einer einzigen Frequenz auf. Sobald man die Frequenz verändert stimmen die Eigenschaften bereits nicht mehr.

Bei Verwendung von Koaxial-Kabel für solche Leitungen muss bei der Längenbestimmung unbedingt der Verkürzungsfaktor für den betreffenden Kabeltyp (meistens 0.666) berücksichtigt werden.

Man trifft ab und zu OM's bei denen das oben geschilderte Problem auftritt. Sie spielen dann mit der Kabellänge spielen bis sie eine Länge gefunden haben die im Shack für eine bestimmte QRG ein SWR von 1:1 vorgaukelt. Der OM freut sich über das schöne SWR. In Realität hat sich natürlich am SWR gar nichts geändert, die Impedanz am Antennenspeisepunkt ist immer noch dieselbe. Die Mantelwellen auf dem Speisekabel sind immer noch vorhanden.

Aber der OM ist hochzufrieden, er sieht SWR 1:1, ... denn Glauben macht selig.

2.2.6.4 Auswirkungen des SWR bei symmetrischen Speiseleitungen

Auf symmetrischen Speiseleitungen spielt sich prinzipiell genau dasselbe ab wie auf Koaxialkabeln.

Allerdings haben symmetrische Speiseleitungen so kleine Verluste, dass auch ein hohes SWR keine nennenswerten Zusatzverluste verursacht.



Auf symmetrischen Speiseleitungen können wir das SWR vergessen.