### Welligkeit auf HF-Leitungen

# Antennenanpassung ohne Formeln erklärt

*Das SWR gilt als „das" Qualitätskriterium für ein Antennenspeisesystem. Doch lauern hier Denkfallen und Verständnisklippen, die zu Fehlinterpretationen führen können. Davor schützt ein umfassendes Wissen, das unser Beitrag vermittelt – mit dem Anspruch, ohne Formeln auszukommen.*

*Vorgänge auf HF-Leitungen lassen sich mit verschiedenen Methoden betrachten. Im akademischen Bereich pflegt man die Herangehensweise mithilfe der Leitungsgleichungen. Dr. David Walker hat diesen Beitrag nicht nur hilfreich begutachtet, sondern auch auf diese Weise überprüft. Dafür vielen Dank! Die Arbeit kann unter walker.d@t-online.de abgefordert werden.*

Damit der Leser über die Formelfreiheit hinaus möglichst mühelos eventuelle Wissenslücken schließen kann, hat der Autor diejenigen Fragen, bei denen nach seiner Ansicht Unklarheiten bestehen könnten, formuliert und beantwortet.

## Was bedeutet „Stehwelle"?

Die Begriffe „Stehwelle" oder „stehende Wellen" sind ebenso verbreitet wie irreführend. Denn eine Welle kann nicht stehenbleiben. Trifft sie auf ein Hindernis, so wird sie reflektiert, absorbiert oder gestreut. Auf einer Antennenleitung kommt es durch deren Dämpfung zur Absorption und durch Fehlabschluss zur Reflexion. Dabei überlagert der reflektierte Anteil den immer noch aus Richtung der Quelle kommenden Anteil der Welle. Gemäß den Gesetzen der Überlagerung von Spannungen und Strömen bilden sich nun, ausgehend von der Reflexionsstelle, auf dem Weg zwischen Quelle und Reflexionsstelle Gesamtspannungen und Gesamtströme aus. Da sich hineilender und reflektierter Anteil mit der gleichen Geschwindigkeit fortbewegen, entstehen bei einem kontinuierlichen Signal zwischen Quelle und Reflexionsstelle an jedem Ort stabile Gesamtspannungen bzw. -ströme. Ist die Leitung lang genug, sind ortsfeste Maxima und Minima zu konstatieren, wobei letztere bei Totalreflexion null erreichen. Trägt man den Verlauf der Gesamtspannung oder des Gesamtstroms über der Leitung auf, so ergibt sich ein welliger Verlauf. Statt von „Stehwelle" oder „stehenden Wellen" sollte man besser von „Welligkeit" sprechen.

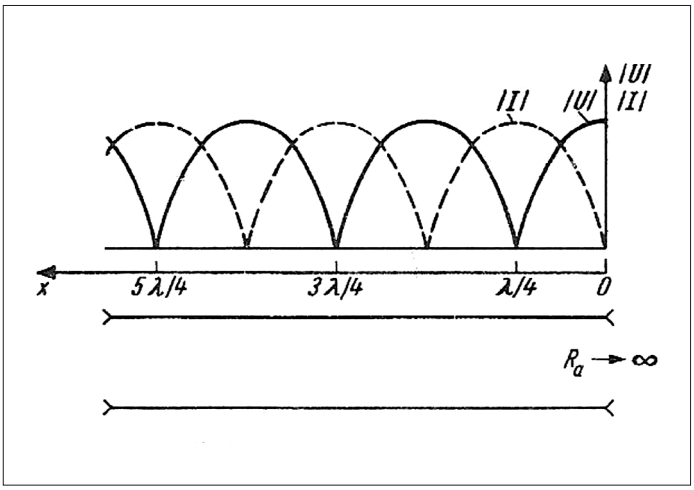


**Bild 1: Strom (gestrichelt) und Spannung (ausgezogen) bei Leerlauf**

## Wo liegen Minima und Maxima?

Ist der Abschlusswiderstand ohmsch und größer als der Wellenwiderstand, liegt ein Spannungsmaximum am Ende der Leitung. Bild 1 illustriert den Extremfall der offenen Leitung. Ist der Abschlusswiderstand ohmsch und kleiner als der Wellenwiderstand, liegt ein Spannungsminimum am Ende der Leitung. Im Extremfall der kurzgeschlossenen Leitung ist die Spannung natürlich null (Bild 2).

Zwecks Unabhängigkeit von Signalfrequenz und Verkürzungsfaktor gibt man die Länge einer Leitung bekanntlich in Signalwellenlängen (λ) auf der Leitung an. Ebenso ist das bei Abständen sinnvoll. Der Abstand zwischen Minima und Maxima beträgt λ/4. Minima/Nullstellen untereinander haben daher genauso wie Maxima untereinander den Abstand λ /2.

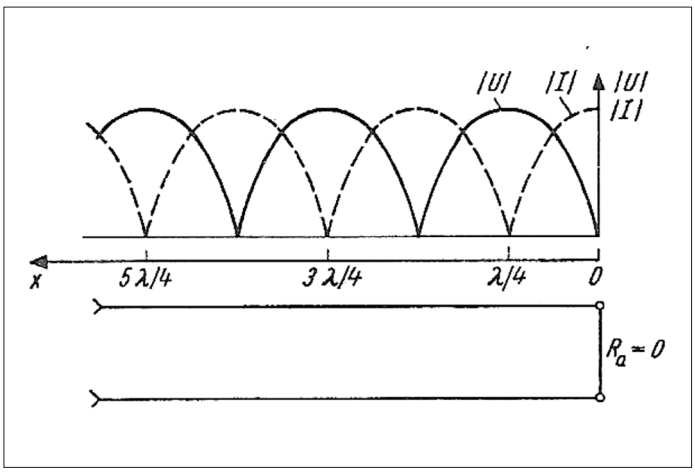


**Bild 2: Strom (gestrichelt) und Spannung (ausgezogen) bei Kurzschluss**

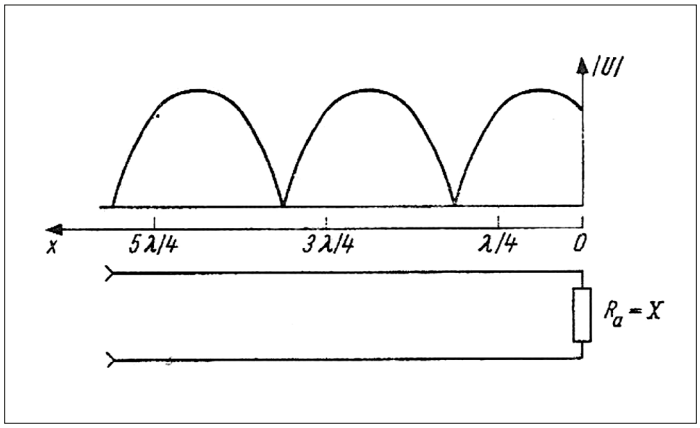


*Bild 3: Strom (gestrichelt) und Spannung (ausgezogen) bei Blindlast (Widerstand soll L oder C bzw. $X_L$ oder $X_C$ symbolisieren)*

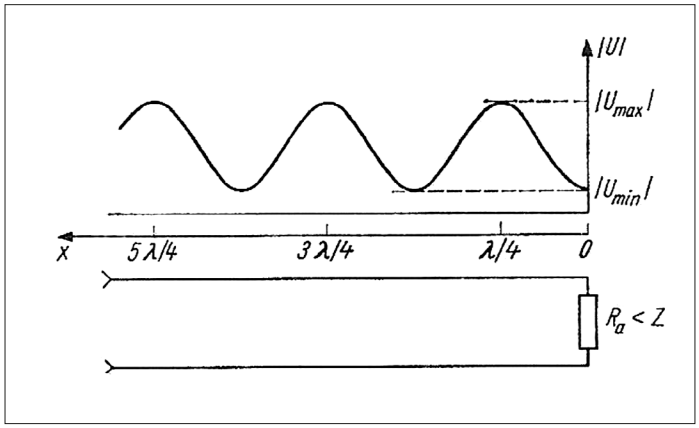


*Bild 4: Spannung auf einer Leitung, die mit einem zu geringen Widerstand abgeschlossen ist*

### Wie beeinflusst eine Blindkomponente die Welligkeit?

Wird eine Leitung mit einem induktiven oder kapazitiven Blindwiderstand X abgeschlossen, dann kommt es zur Totalreflexion, da ein Blindwiderstand zwar Energie speichern, aber nicht verbrauchen kann. Die Welligkeit ist nur längs der Leitung abhängig vom Verhältnis aus Wellenwiderstand $Z_W$ und X verschoben. Bild 3 skizziert das.

### Welche Gesamtspannung stellt sich am Generator ein?

Da Minimum oder Maximum bei ohmscher Fehlanpassung am Ende liegen und sich bei Fehlanpassung mit X oder komplexer Fehlanpassung mit Z vom Ende aus definieren lassen und da sich weitere Minima/Maxima in festen Abständen von λ/4 ausbilden, muss die Spannung am Generator von der Leitungslänge mitbestimmt werden. Jetzt wird verständlich, warum die Darstellungen in Bild 1 bis 3 von der Lastseite ausgehen und zum Generator hin „offen“ sind. Man kann den angepassten (!) Generator gedanklich an jeder Stelle der Leitung platzieren, wobei dann die vorgezeichnete Gesamtspannung an ihm auftritt.

### Was ist das SWR?

Auf einer am Ende angepassten Leitung kann keine Welligkeit entstehen, da nicht reflektiert wird. Das gilt auch bei fehlangepasstem Generator. Mit steigender Fehlanpassung nimmt die Welligkeit zu, da ein immer größerer Anteil der hinlaufenden Welle zurückgeschickt wird. Minima und Maxima bilden sich daher immer deutlicher aus. Setzt man die Spannung im Maximum mit der Spannung im Minimum ins Verhältnis, so erhält man eine Zahl >1. Dabei spricht man vom Stehwellenverhältnis (Standing Wave Ratio, SWR). Auch dieser Begriff irritiert, impliziert er doch, dass hier zwei Wellen ins Verhältnis gesetzt werden. In Wirklichkeit werden Maximum und Minimum der Gesamtspannung aus hin- und rücklaufender Welle ins Verhältnis gesetzt. Treffender würde man sagen „Welligkeitsfaktor“.

### Wie groß kann das SWR werden?

Unendlich groß beim Auftreten von Nullstellen. (Die Division durch Null ist zwar nicht definiert, die Tendenz aber eindeutig.)

### Warum die Abkürzung VSWR?

VSWR bedeutet Voltage Standing Wave Ratio. Das V weist also darauf hin, dass das SWR anhand von Spannungen gebildet wurde. Das V irritiert insofern als sich auf Basis des Stromes bei verlustloser Leitung immer das gleiche Resultat ergeben würde, denn U und I zeigen dann die gleiche Form der Welligkeit. Dämpfung rechtfertigt somit das V. Jedoch hält der Autor folgende Erklärungen für wahrscheinlicher:

1. Es ist einfacher, Spannungen an Leitungen zu messen als Ströme auf diesen.

2. Weil man deswegen die I-Welligkeit nicht feststellte, war man sich über die Formgleichheit nicht im Klaren.

3. Die Verläufe der Welligkeiten von U und I auf der Leitung sind um λ/4 verschoben.

Es sei festgehalten: Die Abkürzung SWR genügt. Ebenso überflüssig wie das V ist übrigens das :1, weil dieses immer auftritt. Also schreibe man doch statt VSWR = 2,3:1 besser SWR = 2,3. Man sollte auch die Abkürzung SWV (Stehwellenverhältnis) vermeiden, denn es wurde ja auch bei anderen Abkürzungen wie SNR, CMRR oder NPR das „Ratio“ nicht eingedeutscht.

### Wie lässt sich Welligkeit zahlenmäßig erfassen?

1. auf die schon angesprochene klassische Art durch das Verhältnis von Maximum zu Minimum der Welligkeit

Etwa in Bild 4 lässt sich ein Verhältnis von $U_{max}$ zu $U_{min}$ von 4,3 ausmachen. Diese Methode hat mehr theoretische Bedeutung, da praktisch meist nur sehr umständlich durchführbar. Ein weiterer praktischer Mangel wird noch gezeigt.

2. durch mathematische Verknüpfung der Spannungen oder Ströme der hin- und rücklaufenden Welle

Diese Methode beruht auf einem Richtkoppler und hat sich in der Praxis durchgesetzt, u.a., weil sie mit dem vorhandenen Sender möglich ist (also im laufenden Betrieb). Da die mathematische Verknüpfung nicht ganz einfach ist, hat man das Kreuzzeigerinstrument erdacht. Die grünen Linien auf der Skala in Bild 5 entsprechen SWRs von 1,3 bis 4, angezeigt wird knapp 1,6 bei ca. 22 kW Vorlauf und 1 kW Rücklauf. Auch ein Network Analyzer besitzt einen internen Richtkoppler und eignet sich daher für Antennenmessungen.

3. mit einer SWR- oder Antennen-Messbrücke

Die Antenne mit ihrer Leitung ist hier Teil einer Brückenschaltung. Zur Speisung der Brücke wird der Sender genutzt. Während des Betriebs muss man die Brücke aber entfernen.

4. mit einem SWR Analyzer oder Antenna Analyzer

Dieses Messgerät beruht ebenfalls auf einer Brückenschaltung, bringt aber einen eigenen Generator mit. Das Aufmacherfoto zeigt ein Beispiel aus der vielfältigen Angebotspalette des Marktes; es misst im Bereich 30 MHz bis 2,7 GHz (Bildquelle: www.lbagroup.com/products/swr-true-3013-wideband-handheld-antenna-cable-rf-analyzer).

***Bild 5: Impression von einem Kreuzzeigerinstrument der Fa. Rhode & Schwarz für einen Rundfunksender (Quelle: Wikipedia)***

5. durch Verhältnisbildung von Abschlusswiderstand und Wellenwiderstand

Dazu muss der Abschlusswiderstand bekannt sein, was bei praktischen Antennen oft nicht der Fall ist.

### Warum decken sich die Welligkeitsverläufe von U und I nicht?

Bei jeder Reflexion gibt es einen Phasensprung entweder bei U oder I des reflektierten Signals. Ob der Phasensprung bei U oder I passiert, darüber entscheidet die Art des Fehlabschlusses der Leitung: Ist der Außenwiderstand größer als der Wellenwiderstand, dann wird der Strom invertiert. Daher entsteht am Leitungsende ein U-Maximum. Ist der Außenwiderstand kleiner als der Wellenwiderstand, dann wird die Spannung invertiert. Daher nun ein U-Minimum. Der λ/4-Versatz ist ein indirekter Beweis für den „Phasensprung“ und damit dafür, dass zur Quelle zurückkehrende Leistung mathematisch ausgedrückt negative Leistung ist.

### Welchen Einfluss hat die Leitungsdämpfung?

Da die Leitungsdämpfung die Werte von U und I zum Leitungsende hin abfallen lässt, ist auch der Verlauf der Welligkeit über der Leitung nicht gleichförmig. Ist man sich darüber bewusst, dass ein Phasensprung bei U oder I erfolgt, so darf man vermuten, dass sich für diese beiden Szenarien bei gleichem Grad der Fehlanpassung (z.B. $R_a$ entweder doppelt oder halb so groß wie $Z_W$) im Gegensatz zur verlustlosen Leitung verschiedene Verläufe der Welligkeiten bei U und I ergeben werden. Dass diese Vermutung richtig ist, wird später noch beispielhaft gezeigt.

Grundsätzlich gilt, dass das ermittelte SWR mit Abstand vom Ende der Leitung immer besser (niedriger) wird.

Der Grund ist leicht zu ermitteln: Die rücklaufende Welle wird auf dem Weg von ihrem Entstehungsort bis zum Messort natürlich weiterhin durch die verlustbehaftete Leitung gedämpft. Je näher am Generator man misst, umso größer ist die hinlaufende und umso kleiner die rücklaufende Größe. Somit muss zum Generator hin das Verhältnis aus hinlaufender zu rücklaufender Größe wachsen. Treibt man diesen richtigen Gedanken ins Extreme und nimmt an, dass die Dämpfung der Leitung so groß ist, dass die reflektierte Welle am Sender vernachlässigbar gering ist, so sieht man ein, dass man dort ein SWR nahe 1 messen muss. An der Antenne kann das SWR hingegen 10 oder 20 betragen.

Das „richtige“ SWR liefert Methode 5; es ist am schlechtesten, da am Ende der Leitung gewonnen. Da die Beeinflussung des davon entfernt gemessenen SWRs lediglich von der Leitungsdämpfung abhängt, kann man eine Kurvenschar gemäß Bild 6 zeichnen. Die Größen an X- und Y-Achse könnten ebenfalls als Parameter dienen, sodass andere Diagramme mit identischem Informationsgehalt möglich (und in der Literatur zu finden) sind.

Die Methoden 2 bis 4 beziehen ihre Größen zur SWR-Bestimmung vom selben Punkt. Daher wirkt sich die Leistungsdämpfung bei allen vier Methoden gleich aus; bei Methode 5 tut sie das gar nicht.

Anders bei der klassischen Methode. Diese ist bei einer nennenswerten Leitungsdämpfung besonders problematisch, denn sie beruht auf Größen, die um λ/4 entfernt auf der Leitung auftreten. Dies kann unerwartet heftige Auswirkungen haben, die hier einmal gezeigt werden sollen. Wegen der Verwirrung, welche sie stiften könnten, sei vorausgeschickt, dass sie vom Praktiker ignoriert werden können, da dieser das SWR so nicht ermittelt.

Die Leitung sei λ/4 lang, bereits dann ergeben sich einfach handhabbare Phasenverhältnisse und die beidseitigen Spannungen lassen sich einfach addieren. Um es noch einfacher zu haben, sei die Dämpfung der Leitung als Faktor ausgedrückt: 0,8 (2 dB). 10 V möge der angepasste Generator (keine Rückreflexion) einspeisen und 5 V sollen reflektiert werden. Das bedeutet weiter:

- 8 V (0,8 x 10 V) der hinlaufenden Welle am Ende
- 4 V (0,8 x 5 V) der rücklaufenden Welle am Anfang

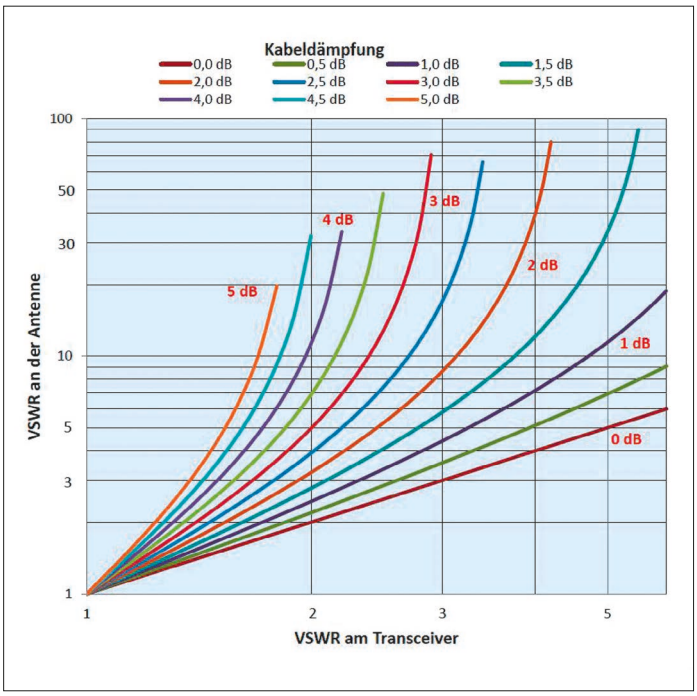


***Bild 6: SWR am Sender und Dämpfung, SWR an der Antenne als Parameter (www.bv-westfalen.de/technik/messtechnik/welche-auswirkungen-hat-ein-schlechtes-swr/)***

Nun gibt es zwei Szenarien:

1. $R_a$ zu groß, daher kein Phasensprung bei der Spannung

- Gesamtspannung am Ende: 8 V + 5 V = 13 V
- Gesamtspannung am Eingang: 10 V + (-4 V) = 10 V - 4 V = 6 V

Da das 4-V-Signal λ/4 auf dem Hin- und nochmal λ/4 auf dem Rückweg zurückgelegt hat, wurde es um 180° in der Phase gedreht (Inversion).

- SWR = 13 V/6 V = 2,17

2. $R_a$ zu klein, daher Phasensprung bei der Spannung

- Gesamtspannung am Ende: 8 V + (-5 V) = 8 V - 5 V = 3 V

Die Begründung für das Minus ist auch hier der Phasensprung.

- Gesamtspannung am Eingang: 10 V + - (-4 V) = 10 V + 4 V = 14 V

Zwei Minuszeichen hier einmal wegen dem Phasensprung und dann, weil das Signal auf Hin- und Rückweg um λ/2 in der Phase gedreht wurde.

- SWR = 14 V/3 V = 4,67

SWR 1,625 oder 4,67 – was stimmt denn nun? Oder stimmt beides nicht?

Ursache der Diskrepanz ist die Dämpfung! Zwar wurden in den Fällen 1 und 2 die Wellen gleich gedämpft (von 10 auf 8 V und von 5 auf 4 V), allerdings bilden sich die Gesamtgrößen anders, sodass die gedämpften Werte verschieden zur Geltung kommen. Ohne Dämpfung müsste sich demnach Übereinstimmung ergeben, und so ist es auch:

1. Lastwiderstand zu groß

- Gesamtspannung am Ende: 10 V + 5 V = 15 V
- Gesamtspannung am Eingang: 10 V + (-5 V) = 5 V

SWR = 3

2. Lastwiderstand zu klein

- Gesamtspannung am Ende: 10 V + (-5 V) = 5 V
- Gesamtspannung am Eingang: 10 V + - (-5 V) = 15 V

SWR = 3

### Warum hat die Dämpfung hier so viel Einfluss?

Die Diskrepanz zwischen den Ergebnissen ist so drastisch, weil jeweils Gesamtspannungen von beiden Seiten der Leitung ins Verhältnis gesetzt wurden, sodass die Dämpfung mit höchstmöglichem verfälschendem Effekt zur Geltung kommen konnte. Bei den Messmethoden 2 bis 4 ist das nicht der Fall, hier stammen alle Größen von einer gemeinsamen Stelle auf der Leitung.

Eine praktische Schwäche der Methode 1 beruht also darauf, dass die ins Verhältnis gesetzten Größen λ/4 voneinander entfernt liegen. Hier kann man noch einen Schritt weitergehen: Ausgehend von einem Maximum oder einem Minimum hat man, wenn die Leitungslänge es hergibt, die Wahl zwischen zwei Bezugspunkten auf der Leitung, einen nach rechts und einen nach links um je λ/4 entfernt. Dämpft die Leitung, dann wird man an diesen um λ/2 voneinander entfernten Punkten unterschiedliche Spannungen messen und somit verschiedene SWR-Werte erhalten.

### Welche Leistungen ergeben sich?

Eine gute Frage, weil sie zur Bestätigung der verblüffenden Rechenergebnisse beitragen kann. Angenommen sei ein 50-Ohm-Kabel:

- hinlaufende Leistung Generatorseite: $(10\ V)^2/50$ Ohm = 2 W
- hinlaufende Leistung Lastseite: $(8\ V)^2/50$ Ohm = 1,28 W
- rücklaufende Leistung Lastseite: $(5\ V)^2/50$ Ohm = 0,5 W
- austretende Leistung: 1,28 W – 0,5 W = 0,78 W
- Wert des zu großen Lastwiderstands: $(8\ V + 5\ V)^2/0{,}78$ W = 217 Ohm
- Verhältnis Lastwiderstand/Wellenwiderstand: 217 Ohm/50 Ohm = 4,33

Das ist das SWR nach Methode 5.

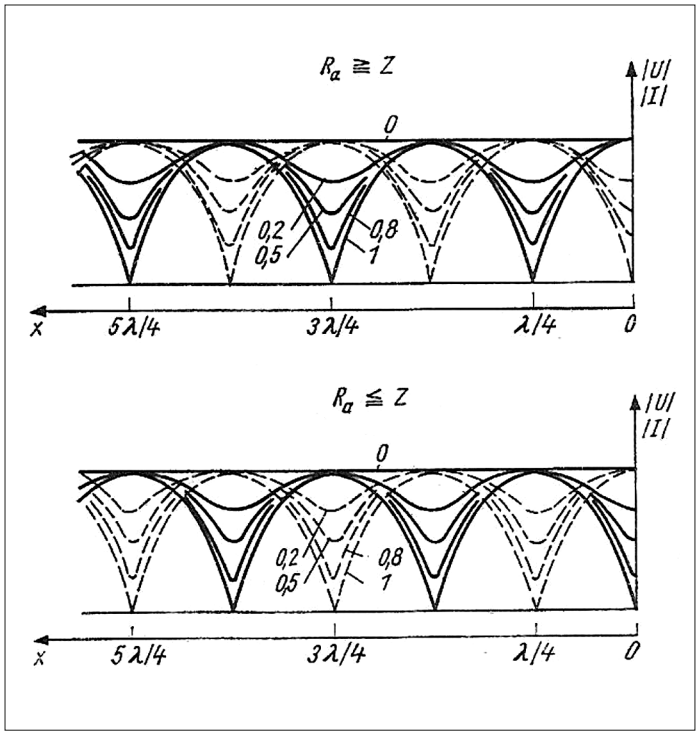


***Bild 7: Strom (gestrichelt) und Spannung (ausgezogen) bei verschiedenen Reflexionsfaktoren. Unten soll illustriert werden, dass sich ein Reflexionsfaktor auch für den Strom errechnen lässt. Der Unterschied liegt nur im Vorzeichen***

- Wert des zu kleinen Lastwiderstands: $(8\ V - 5\ V)^2/0{,}78$ W = 11,54 Ohm
- Verhältnis Wellenwiderstand/Lastwiderstand: 50 Ohm/11,54 Ohm= 4,33

Das ist das SWR nach Methode 5.

Es fehlt übrigens der Vollständigkeit halber noch die

- rücklaufende Leistung Generatorseite: $(4\ V)^2/50$ Ohm = 0,32 W

Diese wird komplett vom Generator wieder aufgenommen (Anpassung).

Die Methode 1 verwirrte also mit SWRs von 1,625 und 4,67, aber die Methode 5 liefert einheitliche SWRs von 4,33 bei zu großem wie zu kleinem Lastwiderstand. Ohne Dämpfung erhält man auch hier wieder ein SWR von 3 in beiden Fällen (es folgen nur die veränderten Daten):

- hinlaufende Leistung: $(10\ V)^2/50$ Ohm = 2 W
- rücklaufende Leistung: $(5\ V)^2/50$ Ohm = 0,5 W
- austretende Leistung: 2 W - 0,5 W = 1,5 W
- Wert des zu großen Lastwiderstands: $(15\ V)^2/1{,}5$ W = 150
- Verhältnis Lastwiderstand/Wellenwiderstand: 150 Ohm/50 Ohm = 3

Das ist das SWR nach Methode 5.

- Wert des zu kleinen Lastwiderstands: $(5\ V)^2/1{,}5$ W = 16,7 Ohm
- Verhältnis Wellenwiderstand/Lastwiderstand: 50 Ohm/16,7 Ohm = 3

Das ist das SWR nach Methode 5.

### Welche Ergebnisse würden die Methoden 2 bis 5 bringen?

Bekanntlich kann ein SWR >1 durch eine zu kleine oder zu große Last zustande kommen. Den Methoden 2 bis 5 ist das gleichgültig. Sie würden bei vernachlässigbarer Kabeldämpfung für 150 und 16,7 Ohm Last als Ergebnis SWR = 3 liefern. Was man bei nur 2 dB Kabeldämp-

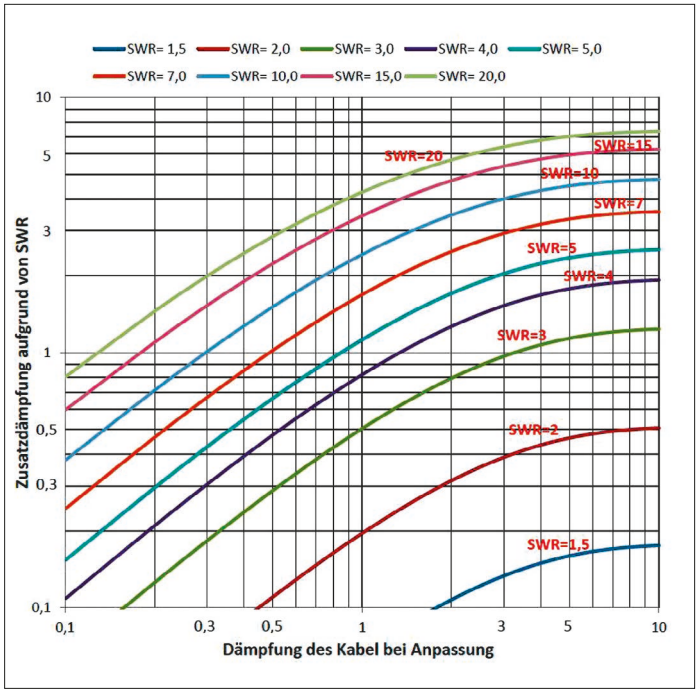


*Bild 8: Diagramm zur Zusatzdämpfung (Quelle s. Bild 6)*

fung messen würde, lässt sich aus Bild 6 ermitteln, nämlich SWR = 2. Man sieht daran: Ein isoliert angegebenes SWR ist eigentlich ziemlich wertlos. Vollwertig wären folgende Angaben:

- SWR an der Antenne: 3
- SWR am Sender bei 2 dB Leitungsdämpfung: 2

## Welche Form hat Welligkeit?

Überlagern sich zwei Sinusgrößen gleicher Frequenz, so entsteht wieder ein sinusförmiges Signal. Dies könnte dazu verleiten, einen sinusförmigen Verlauf der Welligkeit anzunehmen. Damit wäre man jedoch einem Irrtum aufgesessen. Dieser besteht darin, dass man außer Acht gelassen hat, dass die Wellen und damit ihre Spannungen und Ströme auf einer Leitung aneinander vorbeieilen. Dies könnte dazu verleiten, die Form der Welligkeit von der Relativgeschwindigkeit abhängig zu machen. Etwa beim Verkürzungsfaktor 0,67 rückt die Wellenfront mit 200.000 km/s vor. Wegen der Nähe zur Lichtgeschwindigkeit darf man zwecks Ermittlung der Relativgeschwindigkeit nicht einfach addieren, sondern muss die sogenannte Lorentz-Gleichung bemühen, die auf 277 km/s führt. Dieser Wert ist also, beweisbar durch die o.g. Abstände, bezüglich der Welligkeit belanglos.

Bild 7 zeigt Stehwellenverläufe bei zu großem (oben) und zu kleinem (unten) Lastwiderstand, U ausgezogen, I gestrichelt. Diese Darstellung lässt Folgendes vermuten:

1. Die Form der Welligkeit hängt vom SWR ab.

2. Ist das SWR unendlich groß (Nullstellen), gleicht der Verlauf (exakt oder annähernd) der Form eines gleichgerichteten Sinussignals

3. Je mehr das SWR sinkt, umso mehr gleicht sich die Form der Welligkeit der Sinusform an.

Zur Beachtung: Die Kurven werden an die mit 0 bezeichnete Gerade (keine Reflexion) angelegt. Das kann verunsichern, denn alle Spannungsmaxima müssten bei einheitlicher Skalierung über dieser Linie liegen. (Etwa in den obigen Rechnereien würde die Linie 0 ohne Leitungsdämpfung bei 10 V verlaufen, das Maximum der Stehwelle aber 15 V erreichen.)

## Was ist ein Reflexionskoeffizient?

„Koeffizient" kann je nach Fachgebiet mehreres bedeuten. In der Mathematik ist es u.a. ein Parameter, also eine Bedingung oder Nebenbedingung. So gesehen, passt der Ausdruck Reflexionskoeffizient gut in dieses Thema, denn er gibt Auskunft über den Grad der Reflexion und informiert durch sein Vorzeichen darüber, ob der Phasensprung bei U oder I erfolgt:

- Vorzeichen positiv: Phasensprung bei I
- Vorzeichen negativ: Phasensprung bei U

Der Reflexionskoeffizient lässt sich leicht errechnen, man benötigt lediglich:

- Außenwiderstand (Innenwiderstand der Signalquelle oder Lastwiderstand)
- Wellenwiderstand der Leitung

Aus dem Reflexionskoeffizienten lässt sich daher das SWR nach Methode 5 errechnen. Auch vor einer komplexen Last muss der Reflexionsfaktor nicht kapitulieren, er wird dann selbst komplex.

Ist Anpassung auch beim SWR >1 möglich?

HF-Leitungen können nicht nur HF-Leistung übertragen, sondern auch Impedanzen anpassen. Besonders ausgeprägt sind folgende Fälle:

- Eine Leitung der Länge $\lambda/4$ passt eine Impedanz, die kleiner als der Wellenwiderstand ist, an eine Impedanz an, die größer als der Wellenwiderstand ist.
- Eine Leitung der Länge $\lambda/2$ transformiert unabhängig von ihrem Wellenwiderstand 1:1.

Je weiter in beiden Fällen die äußeren Widerstände von $Z_W$ differieren, umso größer ist die Welligkeit auf der Leitung. Das trägt entsprechende Zusatzverluste ein.

Geht man also von der angepassten Leitung ab und nutzt z.B. obige Möglichkeiten, dann ist Anpassung auch bei Welligkeit auf der Leitung möglich. Die Methoden 1, 2 und 5 informieren dann lediglich über das SWR, nicht aber über die Anpassung. Die Methoden 3 und 4 informieren über die Anpassung, nicht aber über das SWR.

## Was hat es mit den Zusatzverlusten auf sich?

Das Diagramm in Bild 8 informiert über zusätzliche Verluste infolge von Welligkeit. Diese sind darauf zurückzuführen, dass der reflektierte Anteil die Speiseleitung erneut durchlaufen muss und dabei wieder der Leitungsdämpfung unterliegt.

Im obigen Beispiel mit 2 dB Leitungsdämpfung und einem Antennen-SWR von 3 sind zusätzliche etwa 0,8 dB zu konstatieren. Die Gesamtdämpfung von 2,8 dB liegt nahe an 3 dB, was halbe Leistung bedeutet. Der Generator schickte $(10\ V)^2/50$ Ohm = 2 W in die Leitung, man kann also von etwas mehr als 1 W an der Antenne ausgehen. Das SWR von 3 dort bedeutet, dass davon 25% auf die Rückreise gehen, es gelangen also etwas mehr als 0,75 W zur Abstrahlung. Errechnet wurden 0,78 W.

## Wie hängen SWR und Reichweite zusammen?

Nur wenn Sender-Ausgangswiderstand und Kabel-Wellenwiderstand gleich sind (einzige Bedingung, Generator-Innenwiderstand kann abweichen), dann lässt sich aus dem für die Antenne ermittelten SWR (im obigen Beispiel 3) auf den Leistungsverzicht schließen. Er beträgt beim SWR 2 11% und beim SWR 3 25%. Da sich die Reichweitenänderung aus der Wurzel des Leistungsverzichts ergibt, folgen für SWR 2 3,3% und für SWR 3 5% Reichweitenverzicht. Die Sorge um ein allzu niedriges Stehwellenverhältnis ist also in den meisten Fällen unbegründet. Statt sich darauf zu konzentrieren, sollte man besser auf eine geringe Dämpfung der Leitung achten. ◄