

Störstellen auf HF-Leitungen

Was heißt „elektrisch kurz“?

Frank Sichla, DL7VFS

Warum hat eine elektrisch kurze Störstelle so gut wie keinen Einfluss auf die Leistungsübertragung trotz hohem SWR? Diese Frage wird hier beantwortet.



Kann es sein, dass viele Funkamateure ein wenig unsicher sind, wenn es um die Antennenanpassung geht? Dass sie z.B. nie eine Stoßstelle in der Antennenleitung zulassen würden, weil diese doch das SWR verschlechtert? Und dass sie ein SWR von beispielsweise 2 als problematisch und verbesserungswürdig ansehen? Solche und andere Unsicherheiten soll dieser Beitrag beseitigen.

Begriffe

Unsicherheiten sind immer dann vorprogrammiert, wenn die Begrifflichkeiten nicht stimmen, wenn man eigentlich nicht genau weiß, was gemeint ist. Darum werden hier zunächst ein paar Begriffe erläutert.

• Abschluss

Darunter versteht man bei HF-Leitungen das Verhältnis von Wellenwiderstand

der Leitung und Außenwiderstand (z.B. Sender-Innenwiderstand oder Antennen-Fußpunktwiderstand). Bei einem wellenwiderstandrichtigen Abschluss ist dieses Verhältnis 1.

• Anpassung

Damit meint man meist Leistungsanpassung zwischen z.B. Sender und Antenne. Diese setzt nicht unbedingt einen wellenwiderstandrichtigen Abschluss und ein Stehwellenverhältnis von 1 voraus.

• elektrisch kurz

Was dabei „kurz“ ist, wird nirgendwo genau definiert, mit Sicherheit ist die elektrische Länge aber wesentlich kleiner als die Wellenlänge. Die hier beschriebenen Betrachtungen und Experimente rechtfertigen jedoch folgende Regel: Elektrisch kurz = maximal 1 % der Wellenlänge. Z.B. hat ein 10-MHz-Signal im Vakuum 30 m und in einem Wireman-Kabel 27 m Wellenlänge (Verkürzungsfaktor 0,9), sodass hier ein bis zu 27 mm langes Leitungsstück als elektrisch kurz angesehen werden kann.

• Stoßstelle

So bezeichnet man bei HF-Leitungen eine Stelle, wo sich der Wellenwiderstand abrupt ändert. Das kann eine unfachmännische Verbindung von zwei Leitungsstücken mit gleichem Wellenwiderstand sein, aber auch eine Verbindungsstelle von zwei Leitungsstücken mit verschiedenen Wellenwiderständen. In beiden Fällen kommt es zu einer Reflexion. Weiter kann man auch dort von einer Stoßstelle sprechen, wo

Zur Person



Frank Sichla, DL7VFS
Funkamateure seit 1981
Studium der Industrie-
elektronik, danach Ent-
wicklungsingenieur, seit
1989 freiberuflicher Lek-
tor, Redakteur und Autor
verheiratet, drei Kinder

Anschrift:
Eckenerstr. 7
02625 Bautzen
frank.sichla@gmx.de

Wellenwiderstand und Außenwiderstand nicht übereinstimmen. Ist das lediglich an der Senderseite der Fall, kommt es zu keiner Reflexion.

• Störstelle

Als Störstelle bezeichnet man in der HF-Technik einen Abschnitt auf einer HF-Leitung, der infolge eines unerwünschten Wellenwiderstands die Anpassung beeinträchtigt. Die Größe der Beeinträchtigung ist von Wellenwiderstandsabweichung und elektrischer Länge der Störstelle abhängig. Elektrisch kurze Störstellen stören die Anpassung nicht erheblich, wie hier noch gezeigt wird. Und Längen von $\lambda/2$ transformieren unabhängig vom Wellenwiderstand 1:1.

• Stehwellenverhältnis

Das SWR ist von seinem Namen her das Verhältnis von Spannungsmaxima zu Spannungsminima oder von Strommaxima zu Stromminima auf der Leitung, wenn diese so lang ist oder als so lang angenommen wird, dass sich diese Maxima und Minima auch ausbilden können. Da man über U oder I immer dasselbe Ergebnis erhält, ist die Abkürzung VSWR (Voltage-SWR) vielleicht irritierend und sollte vermieden werden. Ebenso kann man sich das :1 schenken, schreibt also besser SWR 3 statt SWR 3:1. Die Bestimmung des SWRs gemäß Definition ist umständlich bis unmöglich (Koaxkabel). Man nutzt daher als ebenso sichere Bestimmungsmethode den Vergleich der Spannungen von hinlaufender und rücklaufender Welle (Richtkoppler). Dabei kann man jedoch nicht einfach das Spannungsverhältnis bilden, sondern muss eine Formel bemühen.

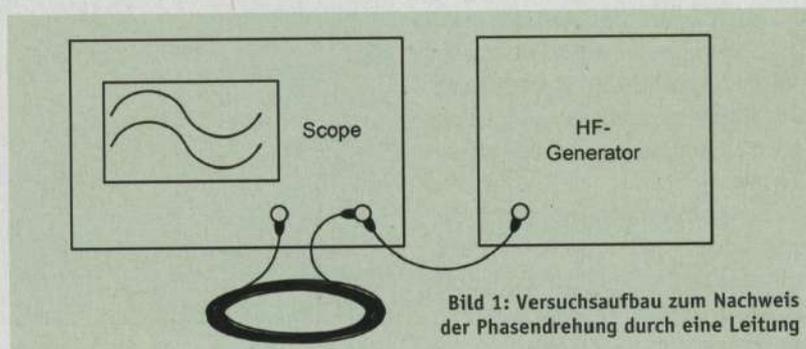


Bild 1: Versuchsaufbau zum Nachweis der Phasendrehung durch eine Leitung

Gar ohne Richtkoppler geht es, wenn Sender-Innenwiderstand und Kabelimpedanz übereinstimmen, denn dann bildet das Verhältnis von Antennenwiderstand und Kabelimpedanz das SWR. Beispielweise mit 25 oder 100 Ω Antennenimpedanz am 50-Ω-Kabel ergibt sich je ein SWR von 2 ($50/25 = 100/50$) entsprechend 11 % Leistungsverzicht gegenüber Leistungsanpassung.

Was sagt Mr. Google?

Warum hat z.B. ein in ein 50-Ω-System eingefügtes elektrisch kurzes 450-Ω-Kabel so gut wie keinen Einfluss auf die Leistungsübertragung, obwohl es doch eine erhebliche Stoßstelle und ein erhebliches SWR verursacht?

Gibt man „elektrisch kurz“ in eine Suchmaschine ein, wird man kaum fündig. Lediglich unter „Warum Wellenwiderstand für kurze Leitung vernachlässigbar?“ fand ich auf www.mikrocontroller.net/topic/95072 verschiedene Antworten. Jedoch entpuppten sich die meisten davon als unausgelegene Behauptungen, wie leider regelrecht typisch für offene Foren ...

Zum Glück ist als Brauchbares ein Hinweis auf 5° Phasendrehung dabei. Also eine geringe Phasendrehung. Genau das ist der richtige Ansatz zur qualifizierten Beantwortung der Frage, warum elektrisch kurze Störstellen trotz hohem möglichen SWR die Leistungsanpassung kaum beeinträchtigen.

Leitungslänge und Phasendrehung

Legt man an eine HF-Leitung eine Wechselspannung, so drehen sich linear zum Abstand vom Generator Spannung und Strom in der Phase auf der Leitung. Das kann man leicht nachweisen, indem man mit einem Zweikanaloszilloskop die Spannungen erfasst (Bild 1). Der Phasenunterschied lässt sich aber auch berechnen. Nimmt man bei 10 MHz z.B. 10 m RG-58, dann beträgt er rund 180°.

Wie ich darauf komme? Ganz einfach:

- 10 MHz bedeutet 30 m Wellenlänge im Vakuum
- Der Verkürzungsfaktor von RG-58 beträgt 0,66, daher ist eine 10-MHz-Welle im Kabel rund 20 m lang.
- Eine volle Wellenlänge bedeutet 380° Phasendrehung.
- Eine halbe Wellenlänge (10 m im RG-58) bedeutet daher 180° Phasendrehung.

Wichtig in dem Zusammenhang: Anpassleitungen haben immer eine gewisse elektrische Länge von z.B. $\lambda/4$ oder $\lambda/2$. Sie sind nie elektrisch kurz. Warum?

Anpassung und Phasendrehung

Weil Anpassung mithilfe einer Leitung nur mit einer signifikanten Phasendrehung gelingt, welche die Anpassleitung herbeiführen muss.

Wichtig zu wissen dabei: Die Anpassung verschiedener Impedanzen mithilfe einer Leitung ist immer mit Reflexionen verbunden. Dabei darf man nicht vergessen, dass auch eine reflektierte Welle in der Phase gedreht wird. Somit genügt eine Viertelwellenleitung, um die Spannungen an der Generatorseite extrem in der Phase zu drehen (Bild 2). Nur aus einer extremen oder deutlichen Phasendrehung schöpfen Anpassleitungen ihre Wirkung.

In Bild 3 sehen wir ein Leitungssystem, auf dem es offenbar starke Reflexionen, also ein hohes SWR gibt infolge von zwei heftigen Stoßstellen mit einem Reflexionsfaktor von je $-0,8$. (Anmerkung: Bei der Formulierung der Formel für r muss man die Richtung der Welle beachten. Sowohl hin- als auch rücklaufende Welle stoßen hier auf 50 Ω, daher gleiche Reflexionsfaktoren.) Dennoch liegt hier keine Störstelle vor, da die Leitung die Phase um 360° dreht. Die Spannung der reflektierten Welle liegt daher am Generator in Phase mit der Spannung der hinlaufenden Welle, denn $2 \times 360^\circ$ entspricht wie $1 \times 360^\circ$.

Für Leistungsanpassung muss die Last 1 V erhalten. Die sinnvoll abgebrochene Berechnung mit dem „Wellenfahrplan“ in Bild 4 zeigt es. Das Ganze wirkt komplizierter als es ist: Man muss nur fortwährend mit $-0,8$ multiplizieren, um auf die Teilwerte zu kommen, die man anschließend vorzeichenrichtig addiert.

Was nun ist der Unterschied zwischen einer Ganzwellenleitung, die unabhängig von ihrem Wellenwiderstand 1:1 transformiert, und einer elektrisch kurzen Leitung? Die Antwort wird vielleicht überraschen: Wäre statt der Ganzwellenleitung eine elektrisch kurze Leitung vorhanden, so müsste man genauso rechnen wie in Bild 4! Denn für die elektrisch kurze Leitung könnte man näherungsweise eine Phasenverschiebung von 0° ansetzen, entsprechend der durch die Ganzwellenleitung verursachten Phasenverschiebung von 360°.

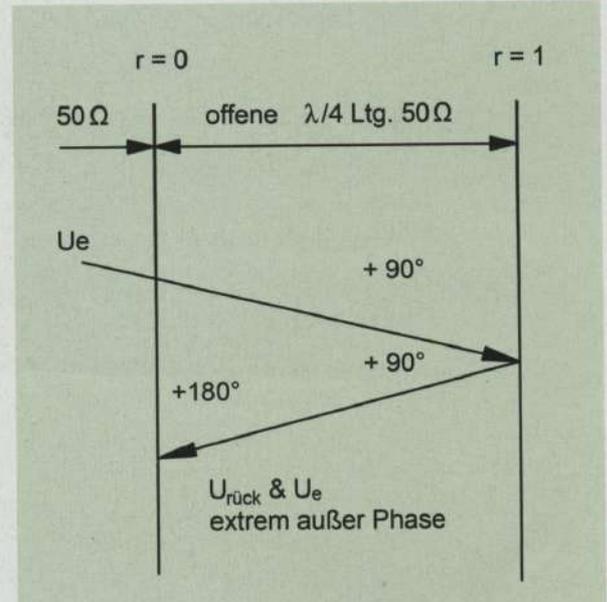


Bild 2: Wellenfahrplan für eine offene Viertelwellenleitung

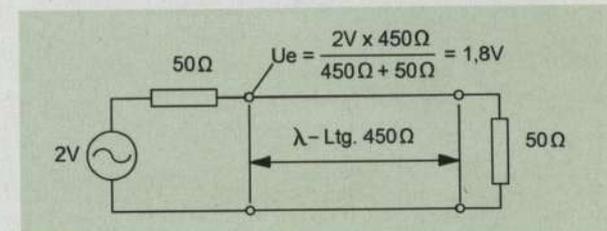


Bild 3: Leistungsanpassung zwischen einem 50-Ω-Generator und einer 50-Ω-Last mithilfe einer 450-Ω-Ganzwellenleitung

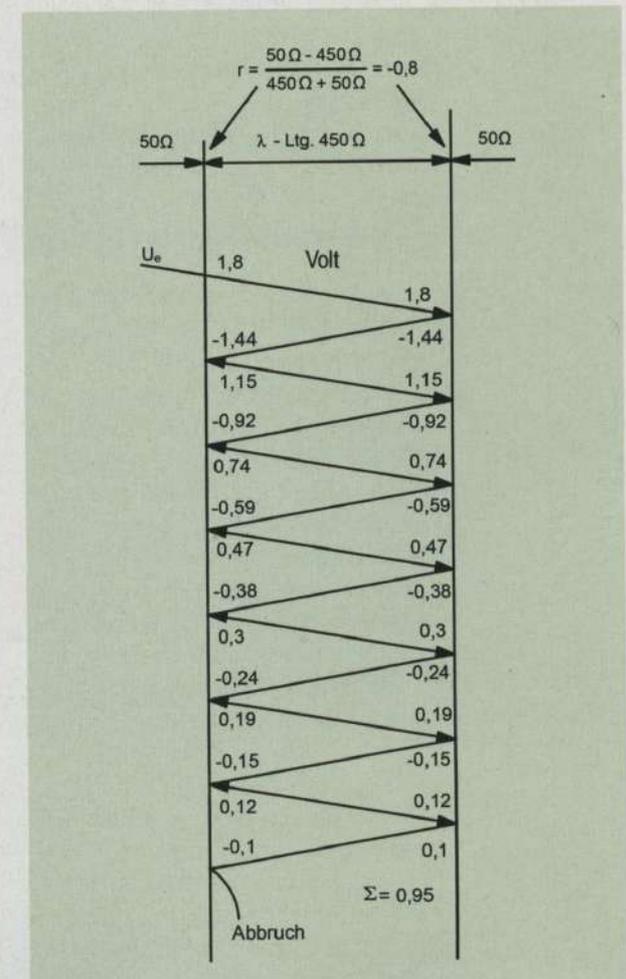


Bild 4: Wellenfahrplan für das System nach Bild 3

Im Experiment

Unter Berücksichtigung des Verkürzungsfaktors von 0,9 ist das im Aufmacherfoto gezeigte Stück 450- Ω -Leitung 25 cm lang. Wie groß muss die Wellenlänge sein, damit es mit 1° eine gerade noch vernachlässigbare Phasendrehung bewirkt? Ganz einfach: $360 \times 25 \text{ cm} = 9000 \text{ cm}$ bzw. 90 m lang. Dem entspricht eine Frequenz von 3 MHz (Verkürzungsfaktor beachten: $300 \times 0,9/90$). Ein für einen Test erfreulicher Wert, da das wohl jeder HF-Generator leistet.

Werden dafür die im Aufmacherbild erkennbaren beidseitig angeschlossenen RG-58-Kabel benötigt? Nein, denn das eine Stück RG-58 transformiert den Generator-Innenwiderstand 1:1 von 50 Ω zur Wireman-Leitung, während das andere den 50- Ω -Abschlusswiderstand 1:1 an das andere Ende dieser Leitung transformiert. Da es aber immer wieder „Ungläubige“ gibt, habe ich den Test auch mit je 10 m RG-58 gemacht.

Ergebnis:

- Sollwert $U = 1 \text{ V}$
- Messwert ohne RG-58: 995 mV
- Messwert mit RG-58: 925 mV

Das sollte uns nun überhaupt nicht überraschen.

Wenn „kurz“ zu „lang“ wird

Interessant ist es, die Performance in Abhängigkeit der Phasendrehung bzw. elektrischen Länge des störenden Stücks Leitung zu ermitteln. (Wir wissen: 1 % elektrische Länge bedeutet 3,6° Phasendrehung.) Das gelingt leicht durch Erhöhung der Frequenz und somit Erhöhung der elektrischen Länge und somit Phasendrehung. Die Ergebnisse:

- 6 MHz (2°) ohne RG-58: 990 mV
- 6 MHz (2°) mit RG-58: 915 mV
- 9 MHz (3°) ohne RG-58: 980 mV
- 9 MHz (3°) mit RG-58: 880 mV
- 12 MHz (4°) ohne RG-58: 970 mV
- 12 MHz (4°) mit RG-58: 865 mV
- 15 MHz (5°) ohne RG-58: 960 mV
- 15 MHz (5°) mit RG-58: 830 mV

Wir sehen deutlich: Ab jetzt wird es kritisch. Der Forums-Hinweis auf 5° Phasendrehung traf also ins Schwarze. 5° in der Phase entsprechen etwa 1,5 % in der Länge und bedeuten am Generator (wo es drauf ankommt) schon $2 \times 5^\circ = 10^\circ$! Daher dürfte die hier definierte Grenze von 1 % für „elektrisch kurz“ gut begründet sein.

Störstellen in Datenleitungen

Um Missverständnissen vorzubeugen, sollen noch kurz Stoß- und Störstellen bei Datenleitungen angesprochen werden. Denn bei der Datenübertragung stört ein gewisser Pegelverlust weniger, hier steht ein möglichst großer Störabstand im Vordergrund. Es geht nicht darum, eine Leistung möglichst effizient zu übertragen, sondern darum, eine Information sicher zu übermitteln. Reflexionen sind hier potenzielle Störungen, denn sie können den Störabstand herabsetzen, bedeuten sie doch unerwünschte Signalanteile auf der Leitung. Daher sind Störstellen auf Datenleitungen anders zu bewerten als auf Antennenleitungen. Während es auf Antennenleitungen vor allen Dingen darum geht, dass die Störstelle recht kurz ist, spielt bei Datenleitungen die Höhe der reflektierten Spannung (also die Wellenwiderstandsabweichung) die entscheidende Rolle. Leider wird dies von einigen im Internet kursierenden Betrachtungen nicht gesehen, sodass diese leider ziemlich fehlgehen. **CQDL**



Powerpole-Variationen

Die Powerpole-Verbinders sind heute in vielen Shacks für die Stromversorgung der Funkgeräte und der Zubehörgeräte etabliert. Die Farbkombination Rot/Schwarz wird dabei meist assoziiert mit 13,8 V Gleichspannung.

Werden diese Kontakte jedoch mangels Alternativen auch für andere Gleichspannungen im Shack eingesetzt, besteht bei mehrfacher Verwendung der Farbkombination Rot/Schwarz eine potenzielle Verwechslungsgefahr.

Vermeiden lässt sich dies durch Ändern der Farbkombinationen bei den Steckverbindungen (Bild 1). Hier wird die Kombination Rot/Schwarz für den 13,8-V-Ausgang eines Akkupaketes eingesetzt; die Verbindung zum Solarpanel erfolgt über die Gelb/Blaue Verbindung für 16–20 V.

Durch die Verwendung der Farben Rot und Gelb für den Plus-Pol und der Farben Schwarz und Blau für den Minus-Pol

lassen sich bereits vier eindeutig unterscheidbare Kontaktpaare für verschiedene Gleichspannungen bilden, nämlich Rot/Schwarz, Gelb/Schwarz, Rot/Blau und Gelb/Blau. Dabei sollte auf alle Fälle die Kombination Rot/Schwarz weiterhin für 13,8 V Gleichspannung gelten. Da die Powerpole-Kontakte auch zu größeren Kontaktreihen zusammengesteckt werden können, sind damit auch Mehrfach-Verbindungen realisierbar (Bild 2). Hier ist durch die verschiedene Reihung der Farben eine eindeutige Unterscheidung möglich.

Hermann-Josef Link, DB1PA



Bild 2: Simple Mehrfachverbindung



Bild 1: Erhöhte Stecksicherheit durch Farbkombinationen