

Das Stehwellenverhältnis und seine Bedeutung

Von Dr. rer. nat. L. Graf, DL6PC, 5301 Röttgen, Buchenweg 3

Die Begriffe Reflexionsfaktor und Stehwellenverhältnis gehören seit einigen Jahren zum Sprachschatz auch der fachlich nicht einschlägig vorgebildeten Funkamateure. Leider werden in unseren Kreisen immer wieder Ansichten geäußert, die auf eine falsche Interpretation dieser Begriffe schließen lassen. Dies führt unter Umständen zu Fehlbeurteilungen gemessener Werte und infolgedessen zu technisch unsinnigen Maßnahmen.

In diesem Aufsatz wird versucht, die physikalischen Zusammenhänge in leicht faßlicher Form zu erläutern, um dadurch zum besseren Verständnis der Vorgänge bei der Antennenspeisung beizutragen.

Ändern sich an einem Hindernis oder beim Übergang in ein anderes Medium die Ausbreitungsverhältnisse für eine Welle, so wird sie dort vollständig oder teilweise reflektiert. Bei senkrechtem Einfall wandert die reflektierte Welle zum Entstehungsort zurück, wobei sie sich mit der von dort ausgehenden Welle überlagert. Dadurch bilden sich jeweils im Abstand einer halben Wellenlänge zeitlich konstante Verstärkungen (Maxima) und Abschwächungen (Minima) der Amplitude. Im Raum zwischen Entstehungsort und Reflexionsort ergibt sich dadurch das Bild einer „stehenden Welle“.

Man kann solche stehenden Wellen bei allen physikalischen Wellenvorgängen beobachten, wie z. B. beim Schall, beim Licht, und auch bei den uns hier besonders interessierenden elektrischen Wellen. Die Maxima und Minima sind nun umso ausgeprägter, je schroffer der Übergang von einem Ausbreitungsmedium ins andere erfolgt.

Einen solchen schroffen Übergang haben wir in unserem Fall bei einer am Ende offenen oder kurzgeschlossenen elektrischen Doppelleitung. Wenn eine solche Leitung am Eingang von einer Spannungsquelle gespeist wird, kommt Strom bzw. Spannung ja nicht über das Leitungsende hinaus. Aber auch, wenn der Widerstand am Ende der Leitung nicht gerade unendlich oder null ist, sondern irgend einen endlichen Wert hat, können neben einer fortschreitenden Welle die stehenden Wellen nachgewiesen werden.

Eine Ausnahme bildet lediglich der Anschluß eines ohm'schen Widerstands von der Größe des Wellenwiderstandes Z der Leitung. In diesem Fall spricht man von Anpassung und reflexionsfreiem Abschluß.

Die mathematische Elektrotechnik analysiert den allgemeinen Fall eines Energietransportes auf elektrischen Doppelleitungen durch den Ansatz einer zum Leitungsende hin laufenden und einer von dort zurückkehrenden Welle. Wählt man zur Kennzeichnung der Wellen z. B. die zwischen den Leitern auftretenden Spannungen U_v ($v = \text{vorlaufend}$) und U_r ($r = \text{rücklaufend}$), so definiert man als Reflexionsfaktor r das Verhältnis $\frac{U_r}{U_v}$. Die Überlagerung der beiden Wellen führt im sogenannten eingeschwungenen Zustand zu Maximalwerten $U_{\max} = U_v + U_r$, und zu Minimalwerten $U_v - U_r$. Das Verhältnis $\frac{U_{\max}}{U_{\min}}$ wird als das Stehwellenverhältnis (engl.: VSWR = voltage standing wave ratio) bezeichnet.

wave ratio) s bezeichnet. In Formeln schreiben sich diese Zusammenhänge folgendermaßen:

$$s = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{U_v + U_r}{U_v - U_r} = \frac{1+r}{1-r} \quad (\text{mit } r = \frac{U_r}{U_v})$$

$$r = \frac{s-1}{s+1}$$

Wie man sieht, wird bei $U_v = U_r$, d. h. bei einer vollständigen Reflexion (Kurzschluß oder Leerlauf am Leitungsende) $r = 1$ und damit der Nenner 0, womit das Stehwellenverhältnis $s = \infty$ wird.

In der Praxis werden zwar die Spannungs- bzw. Stromwerte wegen der Leitungsverluste nie unendlich, sondern eben nur sehr groß.

Meßtechnisch genutzt werden Stehwellen zum Beispiel zur Bestimmung der Wellenlänge, da die Extremwerte von Spannung und Strom sich auf der Leitung periodisch im Abstand der halben Wellenlänge wiederholen.

U_r und U_v können mit einem Reflektometer (z. B. Monimatch u. dergl.) getrennt gemessen, und s kann unter Benutzung obiger Formel bestimmt werden. Mit dem Stehwellenverhältnis und aus der Kenntnis der Lage der Extremwerte kann man z. B. einen komplexen Anschlußwiderstand nach Wirk- und Blindanteil bestimmen (Prinzip der Meßleitung).

In früheren Jahren wurden im Bereich des Amateurfunks fast ausschließlich offene, symmetrische Zweidrahtleitungen zur Speisung der Antennen benutzt. Dabei liegt im allgemeinen weder bei Dipolen noch bei endgespeisten Antennen Anpassung vor, so daß ausgeprägte stehende Wellen auf der Leitung vorhanden sind. Der Wirkungsgrad solcher Anordnungen muß deshalb aber keineswegs schlecht sein; denn die Dämpfung ist hier, auch beim Auftreten erheblicher Stehwellen, noch verhältnismäßig gering. Aus diesem Grunde bestand für den Amateur früher wenig Anlaß, sich wegen der Stehwellen besondere Gedanken zu machen, oder das Stehwellenverhältnis quantitativ zu bestimmen.

Wenn man dem Stehwellenverhältnis heutzutage mehr Beachtung schenkt, dann hat das seinen Grund in der verbreiteten Verwendung unsymmetrischer Koaxialkabel, in denen die Wellen erheblich stärker gedämpft werden als in offenen Speiseleitungen. Dämpfung bedeutet, daß vom Kabel Hochfrequenz-Energie des Senders absorbiert und in Wärme umgewandelt wird. Eine Erwärmung des Kabels ist, abgesehen von der Tatsache, daß sie auf Kosten unserer kostbaren Sendeenergie erfolgt, auch aus Gründen der mechanischen Festigkeit des Kabelmaterials unerwünscht und nur bis zu einer bestimmten Grenze tolerierbar.

Die Dimensionierung des Kabels muß also den zu erwartenden Betriebsverhältnissen entsprechen. Bei kommerziellen Großsendern wird hier scharf kalkuliert, so daß die wirtschaftlichste Kabeltype verwendet wird. Bei Amateursendern ist das Antennenkabel im Hinblick auf die zu übertragende Leistung in den meisten Fällen überdimensioniert, so daß das Kabel durch Erwärmung selten gefährdet sein dürfte. In Zweifelsfällen muß man die Angaben des Herstellers zu Rate ziehen.

Der uns primär interessierende Leistungsverlust im Kabel kann ebenfalls anhand der Herstellerangaben leicht berechnet werden. Für einige gängige

Kabeltypen (z. B. RG 8-U) finden sich Tabellen und Nomogramme im A.R.R.L.-Handbook. Die Gesamtdämpfung setzt sich gegebenenfalls aus zwei Anteilen zusammen, und zwar einmal aus der Grunddämpfung (in db/100 fuß bzw. in Neper/km), die für reflexionsfreien Abschluß (Anpassung Antenne — Kabel) gilt, und zweitens aus der Zusatzdämpfung beim Vorhandensein von Stehwellen (Fehlanpassung Antenne — Kabel). Letztere wächst mit steigendem Stehwellenverhältnis. Die physikalische Erklärung hierfür ist, daß die in dem Kabel (im metallischen Innen- und Außenleiter sowie im Dielektrikum) erzeugte Wärme mit dem Quadrat der Spannung (bzw. des Stromes) anwächst. Das bedeutet bei ungleichförmiger Strom- und Spannungsverteilung, also bei Stehwellen, daß die Maxima stärker eingehen, als die dem Betrage nach gleich großen Minima.

Rechnet man die Dämpfung für „sein Kabel“ einmal zahlenmäßig aus, so wird man meistens feststellen, daß man die schädliche Wirkung einer Fehlanpassung zwischen Kabel und Antenne überschätzt hat.

Bei geeigneter Wahl der Antenne bzw. ihres Speisepunktes oder durch die Zwischenschaltung eines Anpaßtransformators zwischen Kabelende und Antennenspeisepunkt kann das Stehwellenverhältnis auf dem Kabel herabgesetzt, oder die Stehwellen können praktisch ganz zum Verschwinden gebracht werden.

Neben der erwünschten Verbesserung in bezug auf die Dämpfung ergibt sich hierbei noch der Vorteil, daß der Eingangswiderstand am Leitungsanfang ohmisch und gleich dem Wellenwiderstand des Kabels wird. Dadurch erübrigen sich zusätzliche Transformations- und Anpassungs-Netzwerke am Senderausgang. Man sollte ja heute davon ausgehen können, daß die benutzten Sender für den Anschluß eines niederohmigen Lastwiderstandes von der Größenordnung des Kabel-Wellenwiderstandes eingerichtet sind.

In Amateurkreisen wird nun öfters die Meinung vertreten, die bei Fehlanpassung vom Kabelende reflektierte Welle müsse als verlorene Leistung angesehen werden, und der Reflexionsfaktor r sei ein Maß für die prozentuale Verminderung des Sender-Wirkungsgrades

Diese Auffassung ist falsch. Sie röhrt wahrscheinlich daher, daß man im Zusammenhang mit den Reflektometer-Messungen von Vorlauf- und Rücklauf-Leistung spricht. Die zur Antenne transportierte Wirkleistung ergibt sich aber nach den am Reflektometer abgelesenen Werten aus der Differenz der Spannungsquadrate ($U_v^2 - U_r^2$), wobei U_v keineswegs als Maß für den Nominal-Output des Senders angesehen werden darf. Es soll also hier nochmals klar herausgestellt werden, daß grundätzlich auch bei Fehlanpassung am Kabelende die gleiche Senderleistung wie im angepaßten Fall an die Antenne abgegeben werden kann, wenn man von den meist geringfügigen zusätzlichen Verlusten durch Stehwellen einmal absieht, und wenn die Anpaßschaltung am Senderausgang richtig bemessen und abgestimmt ist. In diesem Fall tritt auch nicht die oft befürchtete Gefährdung der Endröhre ein, da durch die Anpassung zwischen Senderausgang und Kabeleingang (z. B. π -Filter) der für die Endröhre optimale Lastwiderstand hergestellt wird.

Es sei allerdings darauf hingewiesen, daß diese Einstellung bei Frequenzwechsel, auch innerhalb des benutzten Bandes, anhand der Senderinstrumente überprüft und nötigenfalls nachgeregelt werden muß.

Die zur Abstrahlung kommende Leistung des Senders wird gegenüber

dem Nominal-Output um jene Verluste geringer sein, die in den Anpaßschaltungen, im Kabel und im Antennensystem entstehen.

Der Wirkungsgrad der Antenne, d. h. also das Verhältnis der abgestrahlten zur zugeführten Leistung, ist durch das Verhältnis des Strahlungswiderstandes zur Summe aller Verluste bestimmt.

Hierbei schneiden die im Verhältnis zur Wellenlänge kurzen Antennen (z. B. Mobil-Betrieb auf 80 m) ziemlich schlecht ab.

Die Kabelverluste spielen in diesem Falle, auch bei hohem Stehwellenverhältnis, gegenüber dem schlechten Antennenwirkungsgrad nur eine untergeordnete Rolle.



Vielelleicht kann dieser Bericht dein Verständnis über das Stehwellenverhältnis näher bringen.

Die vier Seiten haben nicht die beste Schriftqualität, sind aber lesbar. Das bitte ich zu entschuldigen.

Quelle: DL-QTC 1967, Heft 2, Seite 62-65

