Walter Doberenz DL1JWD

Der Mythos vom antennenseitigen SWR

Jeder Funkamateur hat die Erfahrung gemacht, dass sein **senderseitiges** SWV nicht nur vom Innenwiderstand der PA und vom Wellenwiderstand der Speiseleitung abhängt, sondern ebenso von der Impedanz der Antenne am anderen Ende.
Gemäß Umkehrungsprinzip bzw. Reziprozitätstheorem in linearen passiven Netzwerken (Sendeantenne wird zur Empfangsantenne) muss demzufolge das **antennenseitige** SWV sowohl von der Antennenimpedanz abhängen, als auch von den Kabelparametern und von der Impedanz am Eingang der Speiseleitung.

Es gibt aber immer wieder OMs, die das partout nicht wahrhaben wollen und - anstatt mal selbst zu hinterfragen oder zu messen - gleich zum Generalangriff auf die Gesetze der Physik übergehen, wie es das beigefügte Traktat von OM Ludwig zeigt. Dieses gipfelt in der bizarren Feststellung "Ein Einfluss der Anpassung am Generator auf das SWV an der Last ist nicht erkennbar".

Begriffsdefinitionen

Der Reflexionsfaktor (bzw. daraus abgeleitet das SWR) gilt nicht nur für Leitungen, sondern allgemein für jede Schnittstelle zwischen einer Quelle (Generator) und einer Last.
Der Ursprung des Begriffs liegt zwar historisch in der Wellenausbreitung auf Leitungen, in der HF-Technik und Elektronik wird das Konzept jedoch universell angewendet – selbst wenn die Verbindung zwischen Generator und Last extrem kurz (mathematisch „punktförmig“) ist (siehe hier).

Der **Reflexionsfaktor** $\boldsymbol{\Gamma}$ ist eine komplexe Zahl und berechnet sich aus dem reellen Innenwiderstand des Generators R_G und der komplexen Lastimpedanz $\mathbf{Z}_A$ zu:

$$\boldsymbol{\Gamma}=\frac{R_G-\boldsymbol{Z_A}}{R_G+\boldsymbol{Z_A}} \quad \text{mit} \quad \boldsymbol{Z_A}=R_A+jX_A$$

Mit $R_1=R_G-R_A$ und $R_2=R_G+R_A$ erhalten wir:

$$\boldsymbol{\Gamma}=\frac{R_1 R_2-X_A^2}{R_2^2+X_A^2}-j\frac{X_A(R_1+R_2)}{R_2^2+X_A^2}$$

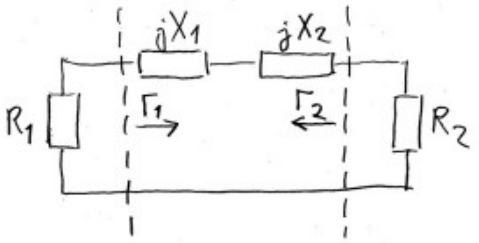
Das **Stehwellenverhältnis** SWR ergibt sich aus dem Betrag des Reflexionsfaktors:

$$SWR=\frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|}$$

Ist, wie beim antennenseitigen SWR, auch der Generatorwiderstand komplex, so muss die generatorseitige Blindkomponente X1 zur lastseitigen Blindkomponente X2 hinzuaddiert, d.h., in Reihe geschaltet werden, so wie es die folgende allgemeine Herleitung zeigt.

Man erkennt, dass es egal ist ob R1 + jX1 die Generator- und R2 + jX2 die Lastimpedanz bezeichnen oder umgekehrt, denn der Absolutbetrag des Reflektionsfaktors ist in jedem der beiden Fälle derselbe. Demzufolge ist auch das SWR für beide Richtungen gleich.

Um eine bequeme Auswertung mit Taschenrechner oder auch Computer vorzubereiten, habe ich die Formel in die Teilausdrücke a, b, c, d zerlegt:



$$\Gamma_1 = \frac{R_1 - (R_2 + j(X_1+X_2))}{R_1 + R_2 + j(X_1+X_2)} \qquad \Gamma_2 = \frac{R_2 - (R_1 + j(X_1+X_2))}{R_1+R_2+j(X_1+X_2)}$$

$$a = R_1 - R_2$$
$$b = -(X_1+X_2)$$
$$c = R_1 + R_2$$
$$d = X_1 + X_2$$

$$\Gamma_1 = \frac{ac+bd}{c^2+d^2} + j\frac{bc-ad}{c^2+d^2} \qquad \Gamma_2 = \frac{-ac+bd}{c^2+d^2} + j\frac{bc+ad}{c^2+d^2}$$

$$|\Gamma_1| = |\Gamma_2| = |\Gamma|$$

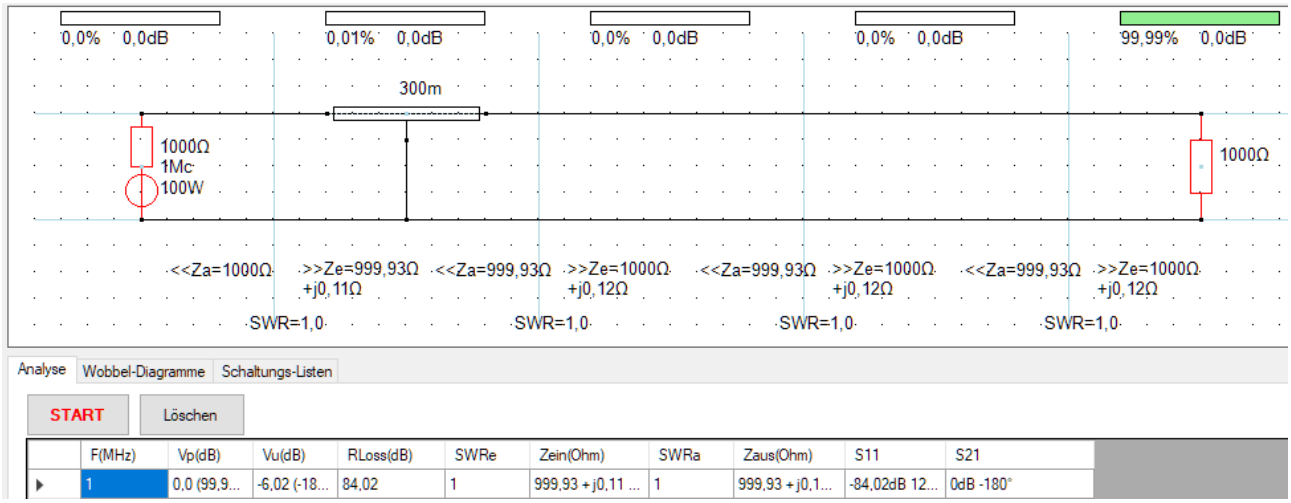
$$SWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|}$$

An diesem Beispiel scheiden sich die Geister

Für seine "Beweisführung" verwendet Ludwig eine fiktive Antenne, die bei 1MHz einen Strahlungswiderstand von 1000Ohm hat und über 300m verlustfreies 50Ohm-Koaxkabel (VF=1) gespeist wird.
Da ein idealer verlustfreier ATU angenommen wird, gilt **senderseitiges SWV = 1,0**.
Diesbezüglich herrscht also zwischen unseren Standpunkten Einigkeit.

Aber jetzt kommt es zum Streitpunkt, denn OM Ludwig gelingt tatsächlich der "Nachweis", dass ein **antennenseitiges SWV=20** vorliegen muss.

Ich habe dieses Beispiel sowohl mit dem Kabelrechner als auch mit dem Kleinen Netzwerk-analysator nachgestellt und komme zum Ergebnis:
Ludwig liegt falsch, denn **bei RG = 1000 Ohm hat das antennenseitige SWV den Wert 1,0**!



Da Ludwig die (verlustlose) Leitung exakt eine Wellenlänge lang gemacht hat, herrschen an beiden Enden die gleichen Strom- und Spannungsverhältnisse. Bereits der gesunde Ingenieurverstand reicht aus um festzustellen, dass die SWR an Ein- und Ausgang der Leitung den Idealwert 1,0 haben müssen.

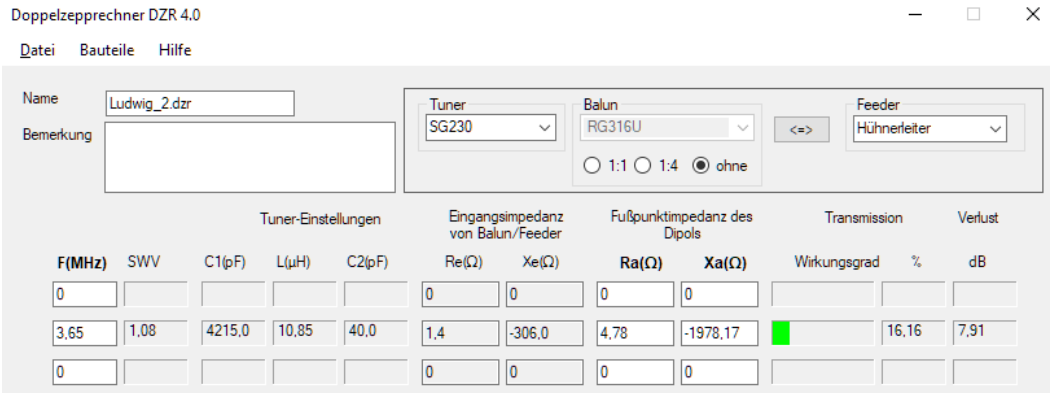
Wenn, wie Ludwig behauptet, das antennenseitige SWR allein vom Wellenwiderstand des Kabels und von der Lastimpedanz abhängt, müsste auch die Länge des Kabels ohne Einfluss sein. Spätestens bei elektrische kurzen Kabeln (dies sind die meisten Antennen-Speiseleitungen im KW-Bereich) müsste Ludwig die Haltlosigkeit seiner These erkennen.

Berechnungen mit verlustfreien Kabeln sind realitätsfremd!

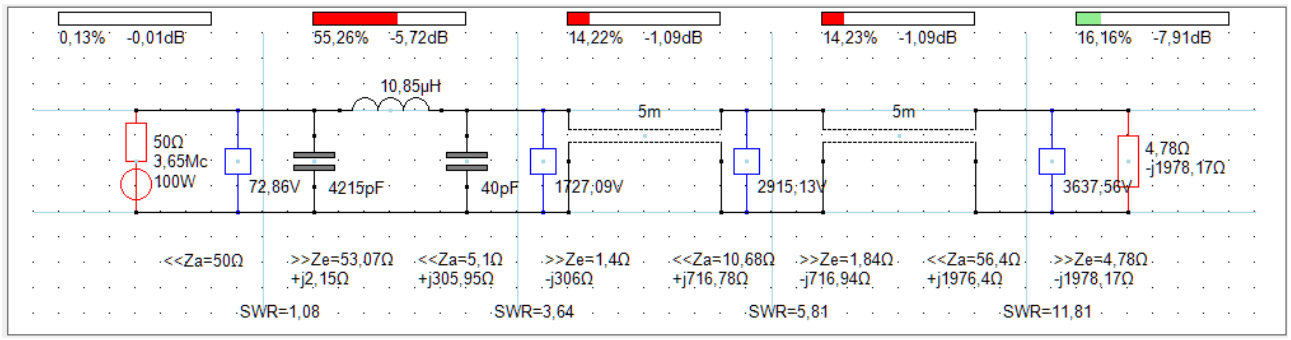
Um den mathematischen Aufwand gering zu halten vernachlässigen, wie Ludwig, viele Autoren allzu gerne die Leitungsdämpfung und vergessen dabei, dass auf diese Weise selbst bei sehr hochwertigen Feedern oft Ergebnisse zustande kommen, die fernab der Realität liegen.

Im Beispiel 1 des Kabelrechners demonstriere ich dies anhand eines 2x6,5m Dipols (Fußpunktimpedanz bei 3,65MHz: 4,78-j1978 Ohm), der mit einer 10m langen Hühnerleiter gespeist wird.Wenn man (mit verlustfreien ATU) senderseitig ein SWR = 1,0 erreicht, gilt antennenseitig SWR = 4,5.
Obwohl die Grunddämpfung der Leitung bei 3,65MHz nur 0,01dB(!) beträgt, erreicht die SWV-bedingte Zusatzdämpfung bereits einen Wert von 4,5dB!
Letztendlich kann der Gesamtwirkungsgrad dieser Antenne maximal nur 36% erreichen.

Doch auch das bleibt weitgehend graue Theorie, denn mit einem realen ATU (SG230; QL=250; QC=1000) geht der Wirkungsgrad extrem nach unten, wie es die Simulation mit dem Doppelzepprechner zeigt (Fußpunktimpedanz des Dipols wurde direkt eingetragen):



Der KNWA bestätigt den DZR und zeigt wo die Leistung verloren geht:



Um zu demonstrieren, wie stark aufgrund der Verlustwiderstände Spannung und SWR in Richtung Antenne ansteigen habe ich hier die 10m Hühnerleiter in zwei 5m Stücke aufgeteilt.

Fazit

- Die „Etablierte Leitungstheorie“ stößt bei „elektrisch kurzen“ Leitungen, wie sie z.B. bei Antennen-Speiseleitungen im KW-Bereich dominieren, an ihre Grenzen.

- Berechnungen von Antennensystemen, die die ohm'schen Verluste von Leitung und Bauelementen nicht berücksichtigen (wie zum Beispiel mit LtSpice), eignen sich vielleicht für den Hörsaal, sind aber praktisch unbrauchbar!