

SWV-Angabe im Kabelrechner

1 Ausgangssituation

Bei der Arbeit mit dem Programm „Kabelrechner“ von Om Walter Doberenz, DL1JWD, fiel mir ein merkwürdiger SWV-Wert auf. Es handelte sich um das antennenseitige SWV bei idealem Antennentuner. Nach meiner Auffassung wäre hier ein anderer Wert zu erwarten. Dieser müsste sich aus dem Wellenwiderstand der Speiseleitung und der Lastimpedanz (Antenne) bilden lassen.

Om Walter begründete die angezeigten Werte so: „dass sich das antennenseitige SWR nicht auf die 392Ohm des Feeders bezieht, sondern auf dessen **Ausgangs impedanz**, welche ohne Antennentuner 220,56+j665 Ohm und mit (verlustfreiem) Antennentuner 11,96-j36,58Ohm beträgt (beides also völlig unterschiedliche Werte, was daran liegt, dass in beiden Fällen der Feedereingang unterschiedlich beschaltet ist und der Feeder unterschiedlich transformiert).“

Diese beiden Standpunkte sollen hier genauer beleuchtet werden.

2 mathematische, physikalische Grundlagen

Mir ist zu diesem Thema aus der Fachliteratur folgendes bekannt:

Die Vorgänge auf einer Leitung lassen sich durch die Summe zweier Wellen beschreiben. Eine Welle ist jeweils durch die zeitlichen und örtlichen Verläufe ihrer Spannung und ihres Stroms gekennzeichnet. Spannung und Strom stehen in einem bestimmten Verhältnis, dem Wellenwiderstand. Im HF-Bereich und bei üblichen Leitungen ist dieser Wert in sehr guter Näherung reell.

Gelangt ein Welle (die hinlaufende) am Leitungs“ende“ an die Last, so muss dort der Quotient aus Spannung und Strom zur Impedanz der Last passen. Falls die Lastimpedanz einen anderen Wert als den Wellenwiderstand der Leitung aufweist, müssen Spannung und / oder Strom am Leitungsende „korrigiert“ werden. Das ist nur durch den zweiten Summanden, die rücklaufende Welle, möglich. Bei dieser muss der Quotient aus Spannung und Strom wieder dem Wellenwiderstand genügen. Bedingt durch den Wellencharakter findet eine Reflexion statt. Die Amplituden von Spannung und Strom ergeben sich über den selben Faktor (Reflexionsfaktor) aus den Werten der hinlaufenden Welle. Über die mathematische Abbildung dieser Zusammenhänge kann gezeigt werden, dass Wellenwiderstand, Lastimpedanz und Reflexionsfaktor jeweils eine Einheit bilden. Das Stehwellenverhältnis, gebildet aus den Amplituden der hinlaufenden und der rücklaufenden Welle, ergibt sich ebenfalls aus den zuvor genannten Werten.

Hier kurz die mathematische Fassung, der Einfachheit halber nur der Spezialfall mit reellen Werten als Beispiel. Das ganze kann natürlich auch für komplexe Lastimpedanzen aufgestellt werden.

$$Z_w = \frac{U_{hin}}{I_{hin}} \quad Z_w = \frac{U_{rück}}{I_{rück}} \quad Z_L = \left(\frac{U}{I} \right)_{Leitungsende}$$

$$U_{\text{Leitungsende}} = U_{\text{hin}} + U_{\text{rück}} \quad I_{\text{Leitungsende}} = I_{\text{hin}} - I_{\text{rück}} \quad U_{\text{rück}} = G \cdot U_{\text{hin}} \quad I_{\text{rück}} = G \cdot I_{\text{hin}}$$

$$G = \frac{Z_L - Z_w}{Z_L + Z_w}$$

$$SWV = \frac{U_{\text{hin}} + U_{\text{rück}}}{U_{\text{hin}} - U_{\text{rück}}}$$

$$SWV = \frac{U_{\text{hin}} + G \cdot U_{\text{hin}}}{U_{\text{hin}} - G \cdot U_{\text{hin}}}$$

$$SWV = \frac{1+G}{1-G}$$

Ein Einfluss der Anpassungssituation der Quelle ist nicht zu finden.

3 Simulationsmethode

Unter LTspice existiert ein verlustloses Leitungsmodell. Auf dieser Leitung soll jeweils ein Punkt mit der größten und ein Punkt mit der kleinsten Amplitude gefunden werden. Aus diesen Amplitudenwerten ergibt sich direkt das SWV. Es wird eine Leitungslänge von Lambda gewählt. Auf dieser Länge existieren mindestens ein Maximum und ein Minimum innerhalb der Leitungslänge (nicht an den Enden) und die Eingangsimpedanz ist gleich der Ausgangsimpedanz. Das vereinfacht die Übersicht über die Verhältnisse. Um auf der Leitung viele Stellen der Messung zugänglich zu machen, wird die Leitung in 60 gleiche Stücke aufgeteilt, zwischen denen jeweils der zeitliche Verlauf abgegriffen werden kann.

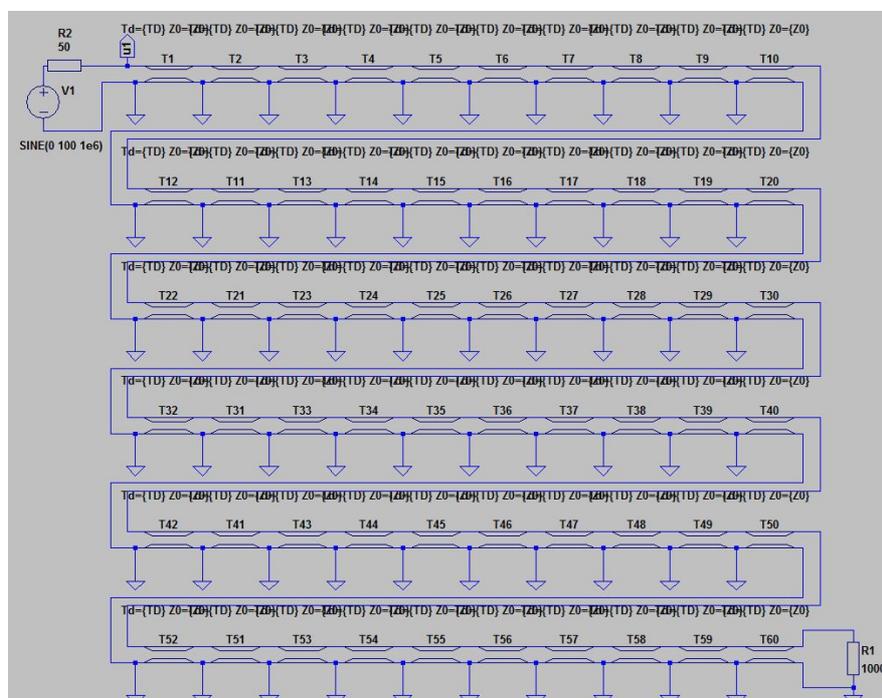


Abbildung 1: Modell unter LTspice

Nach der Simulation wird am Leitungsausgang kontrolliert, wann der stationäre Zustand erreicht wurde. Bei Zeiten ab diesem erfolgt die Auswertung der Amplitudenwerte.

4 Beispiel aus dem Kabelrechner

Die Daten sind in Abbildung 2 zu sehen. Um in allen Feldern definierte Werte zu erhalten, wurde die Kabeldämpfung auf 0,0001 dB / 100 m bei 10 MHz gesetzt. Das dürfte der Dämpfungsfreiheit sehr nahe kommen.

The screenshot shows the 'Kabelrechner 2.3' software interface. The main window title is 'Kabelrechner 2.3' and the user ID is '07 DL1JWD'. The interface is divided into several sections:

- Inputs:** F(MHz) = 1, PA-Leistung(Watt) = 100, Kabelparameter: Zw(Ω) = 50, VF = 1, Länge(m) = 300, a(dB/100m) = 0.0001, @ f(MHz) = 10.
- Impedanzmessung am Eingang des Speisekabels:** RE(Ω) = 999.782, jXE(Ω) = 0, 0μH.
- Fußpunkt-Impedanz der Antenne:** RA(Ω) = 1000, jXA(Ω) = 0, 0μH.
- Mit idealem Antennentuner:**
 - Kabel-Grunddämpfung (dB) = 0
 - SWV-bedingte Zusatzdämpfung (dB) = 0
 - Gesamtdämpfung (dB) = 0
 - Wirkungsgrad(%) = 99.98
 - An RA umgesetzte Leistung(Watt) = 99.98
 - Senderseitiges SWV = 1.00
 - Spannung am Kabeleingang (V) = 316.04
 - Antennenseitiges SWV = 1.00
 - Spannung am Kabelausgang (V) = 316.04
- Ohne Antennentuner:**
 - Kabel-Grunddämpfung (dB) = 0
 - SWV-bedingte Zusatzdämpfung (dB) = 7.41
 - Gesamtdämpfung (dB) = 7.41
 - Wirkungsgrad(%) = 18.14
 - An RA umgesetzte Leistung(Watt) = 18.14
 - Senderseitiges SWV = 20.00
 - Spannung am Kabeleingang (V) = 134.68
 - Antennenseitiges SWV = 20.00
 - Spannung am Kabelausgang (V) = 134.68

Abbildung 2: Rechenbeispiel aus dem Kabelrechner

Der Wert für das antennenseitige SWV unterscheidet sich für beide Fälle ganz erheblich. Das würde bedeuten, dass das Anpassungsverhältnis an der Quelle Einfluss auf das antennenseitige SWV hat.

5 Beispiel aus LTspice

Mit dem Modell in Abbildung 1 wurde die selbe Konstellation wie im Kabelrechner simuliert. Der Fall des idealen Antennentuners wurde mittels Quellwiderstand = 1000 Ohm simuliert und der Fall ohne Antennentuner mit 50 Ohm. Folgende SWV-Werte wurden ermittelt:

R Quelle	R Last	U max	U min	SWV
50 Ohm	1000 Ohm	95,149 V	4,7575 V	20,0
1000 Ohm	1000 Ohm	49,951 V	2,4978 V	20,0

Tabelle 1: Werte aus der Simulation mit LTspice

Das SWV wird durch die Anpassungssituation der Quelle nicht beeinflusst.

6 Schlussfolgerung

Das Ergebnis aus Abschnitt 5 stimmt mit dem Ergebnis aus Abschnitt 2 überein. Das weist darauf hin, dass das antennenseitige SWV nicht von den Anpassungsverhältnissen an der Quelle abhängt.

Das wird auch durch folgende Überlegung gestützt:

Die Leitung sei energiefrei und der Generator wird eingeschaltet. Auf der Leitung breitet sich eine Welle in Richtung Last aus, Strom und Spannung sind über den Wellenwiderstand verkoppelt. Im Falle der Reflexion an der Last breitet sich die rücklaufende Welle in Richtung Generator aus. Ist dieser angepasst, so tritt mit dem Erreichen des Generators der stationäre Zustand ein. Das Verhältnis von rücklaufender Welle zu hinlaufender Welle wird nur durch die Reflexion bestimmt und damit auch das SWV.

Falls der Generator nicht angepasst ist, muss auch an seinem Anschluss eine „Korrektur“ von Spannung und Strom erfolgen. Analog zum Verhalten an der Last müsste eine reflektierte Welle entstehen und sich den beiden bisher bestehenden überlagern. Die Leitungsgleichung(en) lassen aber nur zwei Wellen zu. So bildet sich eine veränderte hinlaufende Welle aus, gebildet aus der bisher hinlaufenden und dem jetzt reflektierten Anteil der rücklaufenden. Diese neue hinlaufende Welle erreicht wieder die Last und es erfolgt wieder eine Reflexion und Bildung einer veränderten rücklaufenden Welle und so weiter. Nach ausreichender Anzahl Läufe hin und her wird praktisch ein stationärer Zustand erreicht. Wenn auch die absoluten Werte der hinlaufenden Welle durch die Anpassung des Generators bestimmt werden, so wird das Verhältnis von rücklaufender Welle zu hinlaufender nur durch die Reflexion an der Last bestimmt. Ein Einfluss der Anpassung am Generator auf das SWV an der Last ist nicht erkennbar.