

Fußpunktwidestand eines $\lambda/2$ -Dipols als Funktion der Höhe h über dem Boden

Der Antennen-Analysator¹ *FA-VA5*, den ich vor einiger Zeit erstand, hat sich bei der Messung der Güte eines *RLC*-Kreises schon bewährt: der mit seiner Hilfe bestimmte Q -Wert stimmte mit dem überein, der sich aus der Aufnahme der Filterkurve mit Hilfe eines Rauschgenerators ergab. Natürlich sollte der *FA-VA5*, wie der Name andeutet, in erster Linie zur Bestimmung von Antennen-Parametern dienen. Einer dieser Parameter ist die Impedanz der Antenne, also der Wechselstromwiderstand, den ein (über ein *HF*-Kabel angeschlossener) Sender am Anschlusspunkt des Kabels an den Antennendraht »sieht«.

Mein erster Einsatz des *FA-VA5* in Sachen Antennenparameter bestand darin, diesen Wechselstromwiderstand (»Fußpunktwidestand«) im Fall eines (mittengespeisten) Halbwellen-Dipols zu messen. Bei Resonanz ist er rein ohmsch, hat also keine kapazitiven oder induktiven Anteile. Er liegt im Bereich zwischen 50 und 100 Ω , abhängig von der Höhe h über dem Erdboden. Für eine verlustfreie Antenne ist er gleich dem Strahlungswiderstand R . Den Verlauf von R als Funktion der Höhe h entnimmt man beispielsweise dem Artikel² von Ch. J. Michaels (*W7XC*) im *ARRL Antenna Compendium*, Vol. 3. Dort ist auch eine Formel zur Berechnung dieser Kurve angegeben.

Gemessen wurde der Fußpunktwidestand für einige Höhen zwischen $h = 0,5$ und 3 m. Der Dipol hatte die Länge $L = 1,55$ m. Er bestand aus zwei 75 cm langen Aluminium-Stäben mit einem Durchmesser vom 8 mm, die mit Greif-Iso-Schellen (Elektro-Installationsmaterial) auf einer kleinen Holzunterlage befestigt wurden. Die Schellen konnten innerhalb gewisser Grenzen justiert werden, so dass sich die Antennenstäbe in einer Linie ausrichten ließen (Augenmaß). Zwischen ihnen blieb eine Lücke von 5 cm frei. Die Enden der Stäbe waren somit genau 1,55 m voneinander entfernt. In der 5 cm breiten Lücke wurden das Symmetrier-Element und die Buchse für das Anschlusskabel angebracht. Das Symmetrier-Element war ein Balun³ mit einem Übersetzungsverhältnis von 1:1. Er bestand aus 3×16 Windungen isoliertem Draht auf einem Ferrit-Ringkern mit 29 mm Außendurchmesser (Abbildung 1). Die Kalibrierung des Analysators (Short-Open-Load-Abschluss der Leitung zwischen *FA-VA5* und Antenne) wurde *hinter* dem Balun vorgenommen, also unmittelbar am Einspeisepunkt in den Dipol.

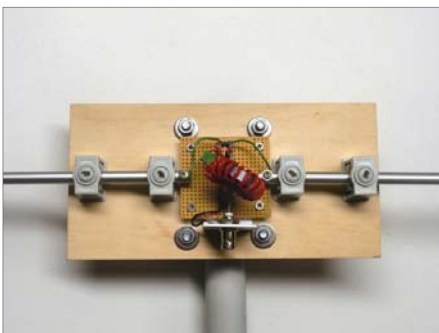


Abbildung 1 Befestigung der Antennenstäbe mit Greif-Iso-Schellen, dem Symmetrier-Element (1:1-Balun auf Ferrit-Ringkern mit 3×16 Windungen) und der BNC-Anschlussbuchse

Der Standort der Antenne war in keiner Weise ideal. Der (horizontal ausgerichtete) Dipol befand sich zwar über ebenem Boden, war aber im Abstand von etwa 3 m von Büschen umgeben (Abbildung 2). Das Buschwerk wirkt als kapazitiver Spannungsteiler gegen Erde und verändert daher die Antennenparameter gegenüber den Werten im Freiraum. Da aber alle Messungen am gleichen Ort

ausgeführt wurden, sollten diese Veränderungen jeden Messpunkt in gleicher Weise betreffen und so auf den Verlauf der Punkte nur wenig Einfluss haben. Im Übrigen sollte die Messung, wie gesagt, nur ein erster Test sein.



Abbildung 2 Im Text beschriebener Dipol der Länge $L = 1,55$ m in einer Höhe $h = 2,50$ m über dem Boden. Wegen der Büsche im Hintergrund kein idealer Standort, für einen Test des Vektor-Antennen-Analysators FA-VA5 ist dies aber unerheblich.

Der FA-VA5 scannt das von der Antenne reflektierte S_{11} -Signal nach Betrag und Phase, und zwar in Abhängigkeit von der Frequenz der (HF-)Welle, die er über das Kabel zum Dipol sendet. Das Signal wird digital ausgewertet und mit Hilfe eines Software-Programms weiterverarbeitet. Die Software erlaubt es, die Antennenimpedanz, getrennt nach Real- und Imaginärteil, und das Stehwellenverhältnis⁴ VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) als Funktion der Frequenz auf dem Bildschirm eines Rechners darzustellen. Abbildung 3 zeigt ein Beispiel. Der $L = 1,55$ m lange Dipol wäre im Idealfall resonant für die Wellenlänge $\lambda = 2L = 3,10$ m, also bei einer Frequenz von $c/\lambda = 97$ MHz. Daher wurde ein Frequenzbereich zwischen 50 MHz und 130 MHz abgetastet.

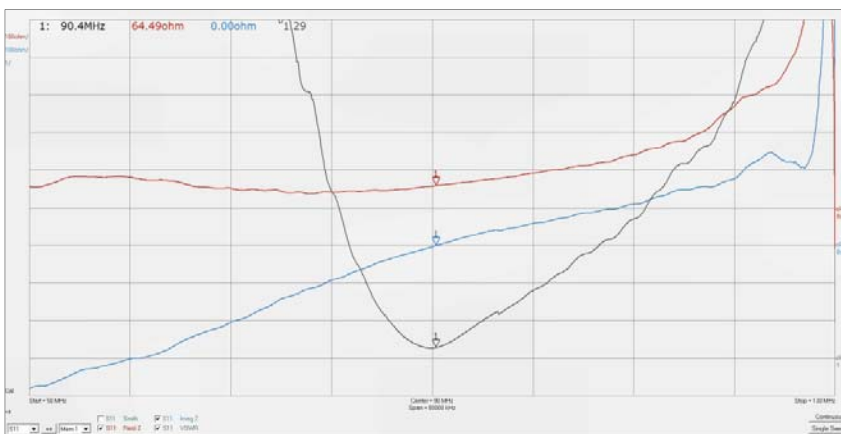


Abbildung 3 Beispiel des Ergebnisses einer S_{11} -Messung an dem im Text beschriebenen Dipol. Rot: Realteil der Antennenimpedanz (Real Z), blau: Imaginärteil der Impedanz (Imag Z), grau: Stehwellenverhältnis (VSWR). Das kleine Dreieck markiert die Stelle der Resonanz (Nulldurchgang des Imaginärteils). Als Resonanzfrequenz liest man ab 90,4 MHz. Die Impedanz bei dieser Frequenz - sie beträgt $64,49 \Omega$ - ist rein ohmsch und gleich dem gesuchten Fußpunktwiderstand.

Ziel der Messung war, wie beschrieben, der Fußpunktwiderstand des Dipols bei Resonanz, also der Realteil der Antennenimpedanz bei verschwindendem Imaginärteil. In Abbildung 3 beispielsweise liegt die Nullstelle des Imaginärteils bei $f_{\text{res}} = 90,4 \text{ MHz}$. Der Realteil hat an dieser Stelle den Wert $R = 64,49 \Omega$. Das ist der gesuchte Fußpunktwiderstand. Dieser wurde, wie gesagt, für verschiedene Höhen h der Antenne über dem Boden gemessen. Das Ergebnis zeigt die Tabelle. Bei zwei Höhen

Tabelle der Messdaten

h	f _{res}	lambda	h/lambda	R	Fehler(R)
m	MHz	m		Ohm	Ohm
0,5	90,02	3,33259	0,15003	48,72	
0,7	89,85	3,33890	0,20965	59,01	
0,8	93,42	3,21130	0,24912	88,11	± 5,2
1,0	94,30	3,18134	0,31433	109,35	
1,1	93,93	3,19387	0,34441	101,5	
1,1	94,85	3,16289	0,34778	106,21	
1,6	90,13	3,32853	0,48069	90,13	
1,6	94,07	3,18911	0,50171	84,9	
1,9	90,49	3,31528	0,57310	52,12	± 6,73
2,15	93,45	3,21027	0,66972	81,91	
2,25	93,61	3,20479	0,70207	86,87	
2,5	93,70	3,20171	0,78083	95,78	
2,5	93,76	3,19966	0,78133	96,1	
2,5	94,00	3,19149	0,78333	100,44	
2,8	94,07	3,18911	0,87799	88,1	

wurde eine ganze Serie von Messungen vorgenommen, so dass aus der Streuung der Werte der Messfehler abgeschätzt werden konnte. Er betrug 6% ($h = 0,8 \text{ m}$) und 13% ($h = 1,9 \text{ m}$), ist also von der Größenordnung 10%.

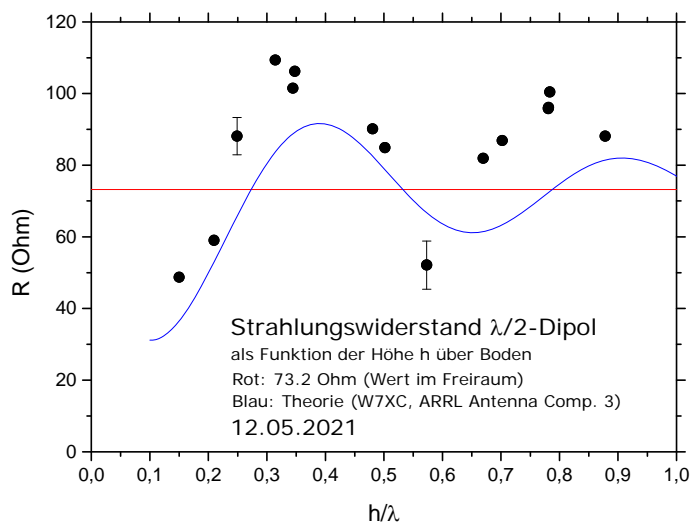


Abbildung 4 Fußpunktwiderstand des im Text beschriebenen Dipols als Funktion der Höhe h über dem Boden (h in Einheiten der Wellenlänge λ). Die Messpunkte folgen dem Trend nach der theoretischen Kurve (blau) für den Strahlungswiderstand eines Halbwellen-Dipols, weichen aber wegen des nicht idealen Standorts der Antenne systematisch von ihr ab. Rot: Strahlungswiderstand $R = 73,2 \text{ Ohm}$ des Dipols im Freiraum.

In Abbildung 4 sind die gemessenen Werte des Fußpunktwiderstands R als Funktion der Höhe h aufgetragen (h in Einheiten der Wellenlänge λ). Es zeigt sich, dass die Messpunkte zwar nicht dem Verlauf, aber immerhin dem Trend der theoretischen Kurve (blau) folgen. Die theoretische Kurve zeigt den Strahlungswiderstand eines idealen Dipols als Funktion von h . Für diesen sind, wie gesagt, Strahlungswiderstand und Fußpunktwiderstand gleich. Die systematische Abweichung zwischen Theorie und Experiment ist vermutlich auf den nicht idealen Standort der Antenne zurückzuführen.

Für einen ersten Versuch, mit dem Antennen-Analysator *FA-VA5* den Fußpunktwiderstand eines Dipols zu messen, ist dieses Ergebnis zufriedenstellend.

Literatur und Anmerkungen

¹ Der Antennen-Analysator *FA-VA5* ist ein Gerät, das eine elektromagnetische Welle über ein Kabel dem zu untersuchenden Bauteil zuführt und ermittelt, welcher Anteil der Welle vom Bauteil zurückgeworfen wird. Die vom Analysator gemessene Größe ist eine komplexe Zahl, genannt Reflexionsfaktor S_{11} , und wird nach Betrag und Phase ermittelt. Der *FA-VA5* wird in Amateurfunk-Kreisen als Bausatz gehandelt. Er wurde von *Michael Knitter (DG5MK)* entworfen, die Software zur Anbindung des Geräts an einen *PC* und zur Darstellung der Ergebnisse auf dem Bildschirm stammt von *Thomas Baier (DG8SAQ)*. Ausführliche Beschreibung des Geräts in: *Funkamateureur* 4/18, S. 322 (2019) und *Funkamateureur* 4/18, S. 436 (2019).

Für den Reflexionsfaktor einer Leitung der Impedanz Z_0 , die mit einer Last der Impedanz Z abgeschlossen ist, gilt

$$S_{11} = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} .$$

Die Last ist in unserem Fall die Antenne, Z ist also die Impedanz, die am Einspeisepunkt (oder Fußpunkt) des Dipols gemessen wird. Die Impedanz Z_0 ist in der Regel der Wellenwiderstand des *HF*-Kabels, also $Z_0 = 50 \Omega$.

² *Ch. J. Michaels* (Amateurfunk-Rufzeichen *W7XC*): *Horizontal Antennas and the Compound Reflection Coefficient*, *ARRL Antenna Compendium*, Vol. 3, S. 175.

³ Eine Bauanleitung für einen Ringkern-Balun findet man zum Beispiel unter <http://www.dl2jas.com/selbstbau/1kern1/1balun1.html> oder <https://vk6ysf.com>

⁴ Das Stehwellenverhältnis (Voltage Standing Wave Ratio, *VSWR*) ist gegeben durch

$$VSWR = \frac{1 + |S_{11}|}{1 - |S_{11}|} .$$

Im Idealfall wird keine *HF*-Energie am Fuß- bzw. Einspeisepunkt der Antenne reflektiert. Dann ist $S_{11} = 0$, also $VSWR = 1$.