

Impedanzermittlung von Koaxialkabel

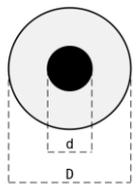
Wilhelm, DL6DCA 24.10.2021



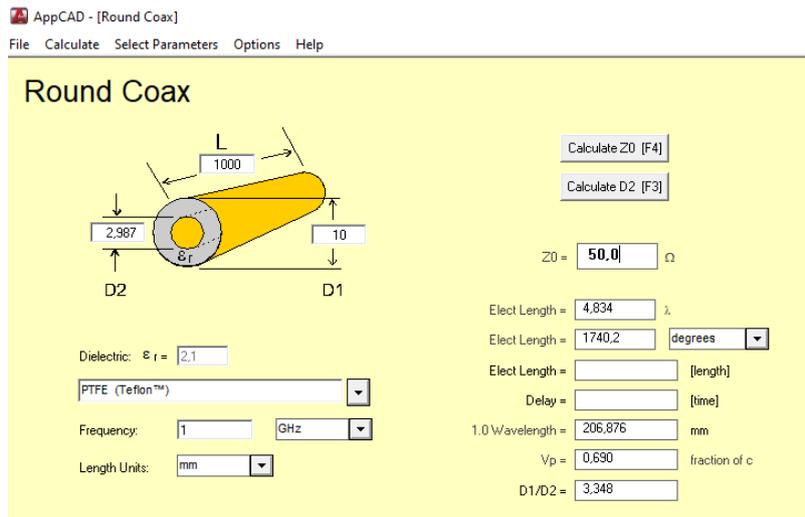
Es wird sicher einige Leser geben die sich fragen, was ich da wieder vorhabe und ob ich nicht lesen kann. Auf den Kabeln steht doch eindeutig zumindest die Bezeichnung und damit ist doch klar, welche Impedanz das Kabel hat. Das trifft auf die allermeisten Kabel tatsächlich zu, aber nicht bei Kabeln in PTFE Ausführung oder Semi-Rigid Kabel, wo der Aufdruck kaum halten würde. Letztere in halbflexibler oder starrer Ausführung. Solche Kabel wurden von diversen Flohmärkten für kleines Geld mitgebracht und dabei waren auch welche in 75 Ω Ausführung. Weshalb 75 Ω ? Weil man sie z. B. zum Bau von Wilkinson-Teilern braucht und genau so etwas soll zum Parallelbetrieb von zwei 70 cm Leistungsendstufen aufgebaut werden.

In der Kabelkiste liegen viele dieser Kabelstücke, aber welches ist das entsprechende 75 Ω Kabel? Einfach mit dem Multimeter / Ohmmeter messen geht nicht.

Es ist ja bekannt, dass das Verhältnis Dicke des Innenleiters (Seele) zum Außenleiter (Innenseite Abschirmung) die Impedanz des Koaxialkabels bestimmt. Also mit einer Schublehre die Maße ermitteln und dann mit einem der im Internet zahlreich zu findenden freien Programme, wie z.B. AppCad (<http://www.hp.woodshot.com/>) nachrechnen. Dabei beachten, dass das richtige Dielektrikum ausgewählt wurde. Wenn man aber sehr dünne Kabel hat und die Seele auch noch aus mehreren geflochtenen Adern besteht, ist diese Schublehre-Methode doch recht ungenau. Natürlich kann man auch ohne Hilfsprogramm nachrechnen:


$$Z_U = \frac{Z_0}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{D}{d}\right) \approx \frac{60 \Omega}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{D}{d}\right) = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

(Aus Wikipedia)



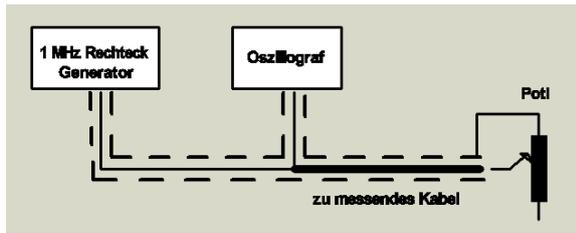
Da bekanntlich die Impedanz von Koaxkabeln nach der Formel $Z_L = \sqrt{L/C}$ berechnet wird, scheint es doch recht einfach zu sein L und C des Kabels direkt mit einem LCR Meter zu messen und dann zu berechnen. Dazu findet man zahlreiche Hinweise im Internet, wo die Messungen kläglich gescheitert sind, bzw. die Ergebnisse sehr stark differierten. Ich habe es selber mit insgesamt 3 verschiedenen Messgeräten ausprobiert und bin auch gescheitert.



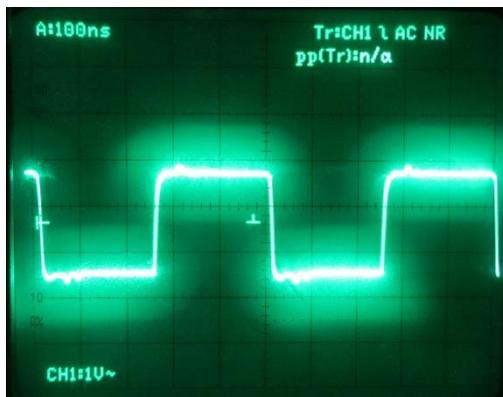
Aber es gibt eine andere einfache Möglichkeit die ich angewandt habe und hier kurz vorstellen möchte, wenngleich auch sie nicht die genaueste ist. Man braucht einen einfachen Oszillografen, ein 1 bis 2 MHz Rechtecksignal und ein 100 Ω Potentiometer. Dazu gibt es im Internet auch ein entsprechendes Video von Afug-Info

<https://www.youtube.com/watch?v=U3T7oX4wOpQ> .

Der Messaufbau ist recht einfach. Man nimmt ein Rechtecksignal mit 1 bis 2 MHz aus einem NF-Generator oder ein TTL-Signal aus z.B. einem alten Zähler. Dieses Signal führt man über einen T-Stecker zum Eingang des Oszillografen. An die andere Seite des T-Stücks klemmt man das zu prüfende Kabel an. Die andere Seite des Kabels wird mit einem Potentiometer, bevorzugt 100 Ω-linear, verbunden. Fertig ist der Messaufbau.

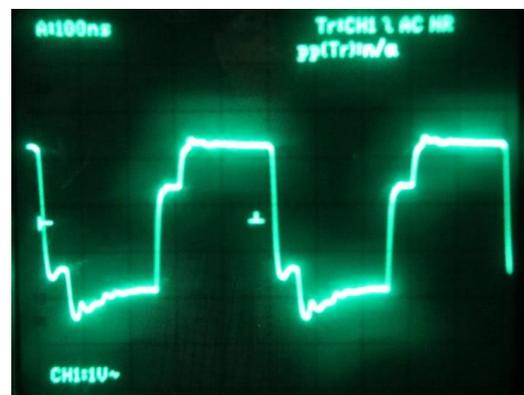


Auf dem Oszillografen sieht man jetzt ein mehr oder weniger verzerrtes Rechtecksignal. Hier ist das Poti auf ca. $10\ \Omega$ eingestellt. Die aufsteigende Flanke des Rechtecks wird „überspitzt“ dargestellt.



Jetzt dreht man vorsichtig das Poti auf einen höheren Widerstandswert, bis ein sauberes Rechtecksignal erscheint. Nach Lösen des zu messendes Kabels kann der Wert des Potis mit einem Ohmmeter (Multimeter) gemessen werden und man hat die Impedanz des Kabels; hier $50\ \Omega$. Ich habe das Poti (siehe Aufmacherbild) in ein kleines Gehäuse eingebaut und mit einer Skala versehen. Dann braucht man das zu messende Kabel natürlich nicht entfernen, sondern kann an der Skala direkt ablesen.

Wenn man den Wert des Potis durch entsprechend weiter erhöht, wird die aufsteigende Flanke stufig; hier ca. $100\ \Omega$.



Es bedarf schon ein wenig Übung und es ist nicht unbedingt das genaueste Verfahren. Insbesondere bei kurzen Kabelstücken sind die „Verformungen“ nicht so eindeutig zu erkennen. Aber es ist durchaus eine brauchbare Methode ein $50\ \Omega$ Kabel von einem $75\ \Omega$ Kabel zu unterscheiden.

Impedanzbestimmung Koaxialkabel mit NanoVNA

Nachdem mich die Messung mit dem Rechteck und der etwas „fummeligen“ Einstellung nicht so richtig zufriedengestellt hat, habe ich weiter im Internet recherchiert und bin über einen youtube Beitrag von Michael, DL2YMR, gestoßen <https://www.outube.com/watch?v=i0aKxAggmWI> . Er zeigt in diesem Video, wie er mithilfe des NanoVNA die Impedanz von Koaxkabeln ausmisst. Übrigens, wer Anleitungen zum Umgang mit dem NanoVNA sucht, wird bei ihm bestens bedient!

Ich habe es nachvollzogen, sowohl auf dem kleinen „Mäusekino“, als auch mittels der SW NanoVNA-Saver V0.3.3 und bin überzeugt von dieser Messmöglichkeit hinsichtlich der Genauigkeit und Bedienung.

Vorweg noch folgende Erkenntnis: Man benötigt zur Frequenzeinstellung des VNA eine vorab durch Längenmessung ermittelte ungefähre Resonanzfrequenz des Kabels. Mein Testkabel aus Ultraflex 7 ist ca. 5,0m lang.

Mit der Überschlagsformel $f = \frac{75}{l}$ errechnen wir die Resonanzfrequenz für $\lambda/4$ des Kabels, Beispielkabel $f = \frac{75}{5,00} = 15,00$ MHz

Das ist die Frequenz, die nun mit einem Aufschlag als Stopfrequenz am VNA einzustellen ist, hier gewählt 30,00 MHz. Die Startfrequenz so gering wie möglich wählen.

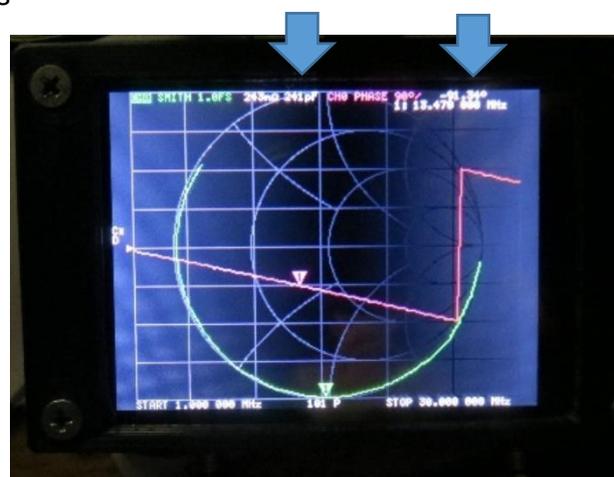
Nach Einstellung der Start- und Stopfrequenz wird der VNA SOL-mäßig kalibriert.

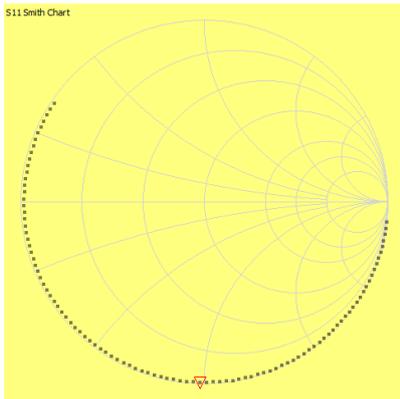
Das Kabel wird an Port 1 des kalibrierten NanoVNA angeschlossen, wobei das andere Ende **offen** bleibt. Nach dem Sweep fährt man zur Ermittlung der Kapazität des Kabels im Smith-Diagramm die Messkurve im kapazitiven Bereich mit dem Marker ab, bis dass die S11 Phase in der Übersicht / bzw. in der Phasendarstellung mit -90° angezeigt wird (geringe Abweichung ist erlaubt). In der Übersicht findet man jetzt auf der linken Seite Series C: 241,48 pF.

Hinweis: Das rechte Bild zeigt das „Mäusekino“, die anderen Abbildungen sind Screenshot des auf dem PC laufenden NanoSaver Programms.

Kabel offen = Ermittlung Kapazität des Kabels

Marker 1			
Frequency:	13.4700 MHz	VSWR:	298.997
Impedance:	327m-j48.9 Ω	Return loss:	-0.058 dB
Series L:	-578.12 nH	Quality factor:	149.5
Series C:	241.48 pF	S11 Phase:	-91.24°
Parallel R:	7.3134 k Ω	S21 Gain:	-75.588 dB
Parallel X:	241.47 pF	S21 Phase:	-49.32°

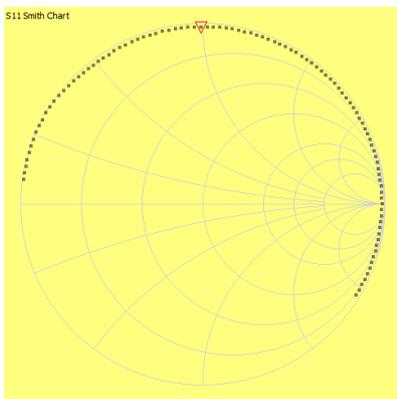
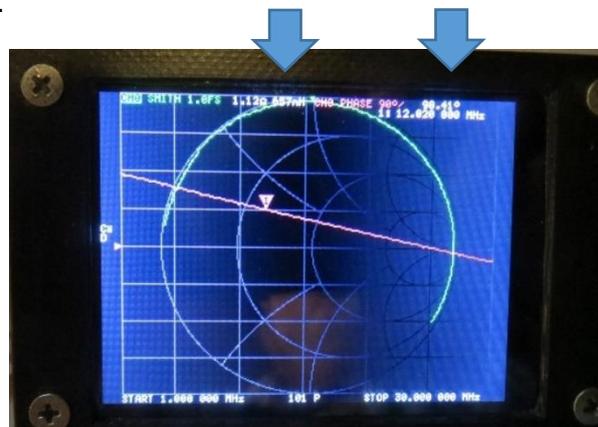




Kabel geschlossen = Ermittlung Induktivität des Kabels

Es wird der gleiche Messvorgang wie zuvor beschrieben durchgeführt, jetzt allerdings mit +90° Phasenwinkel bei geschlossenem Kabel.

Marker 1	
Frequency: 12.0200 MHz	VSWR: 83.602
Impedance: 1.18 +j49.5 Ω	Return loss: -0.208 dB
Series L: 655 nH	Quality factor: 41.79
Series C: -267.66 pF	S11 Phase: 90.60°
Parallel R: 2.0686 kΩ	S21 Gain: -79.976 dB
Parallel X: 655.38 nH	S21 Phase: 55.39°



Mit den ermittelten Werten 241,48 pF und 655 nH wird jetzt die Impedanz nach der Formel

$$Z_L = \sqrt{L/C} \text{ berechnet. } Z_L = \sqrt{655/0,24148} = 52,08 \Omega .$$

Die Impedanzermittlung basiert bei diesem Messverfahren also auf der Messung der Kapazität und Induktivität, wo meine drei anderen Messgeräte versagt haben.

Es gibt aber noch eine weitere Methode, bei der das Kabel nicht offen / geschlossen sondern mit einem 50Ω Widerstand (unabhängig von der Impedanz des zu messenden Kabels) abgeschlossen wird:

Impedanzbestimmung Koaxialkabel mit Vect. Network-Analyser hp8753C / 85046A sowie NanoVNA

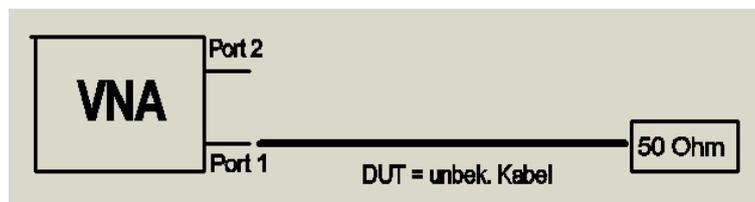
Dazu habe ich ein 3,4 m langes 75 Ω Kabelstück genommen. (Beispiel 3,40 m)

Mit der Überschlagsformel $f = \frac{75}{1}$ wird die Resonanzfrequenz für $\lambda/4$ des Kabels berechnet,
Beispielkabel $f = \frac{75}{3,40} = 22,05$ MHz

Das ist die Frequenz, die nun mit einem Aufschlag als Stopfrequenz am VNA einzustellen ist, hier gewählt 30,00 MHz. Die Startfrequenz so gering wie möglich wählen.

Nach Wahl der Start- / Stopfrequenz ist zwingend eine SOL-Kalibrierung des VNA vorzunehmen!

Die eine Seite des Kabels wird nun mit dem Port 1 des VNA verbunden, das andere Ende des Kabels mit einem 50 Ω Widerstand abgeschlossen.



Als Messart wird S11 und als Darstellung Smith-Diagramm am VNA gewählt.

Auf dem Bildschirm erscheint folgende Darstellung:



Der Marker wird nun auf der Nulllinie des Smith Diagramms (horiz. Pfeil) so positioniert, dass er auf der Kippe induktiver Teil (nH) / kapazitiver Teil (pF) gerade den kapazitiven Bereich erreicht. Letzteres ist in der obigen Messwertzeile (rechter Pfeil) zu sehen.

In der Messwertzeile lesen wir den Ω Wert ab, hier im Beispiel **107 Ω** (linker Pfeil).

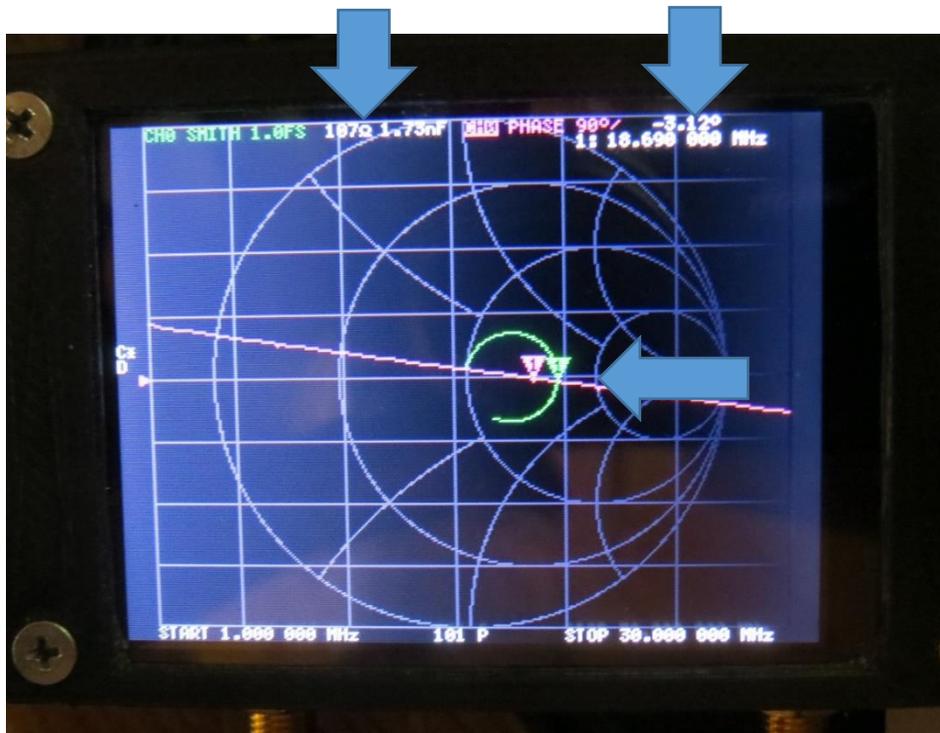
Mit der Formel $Z_0 = \sqrt{Z_{Mess} \times 50}$ lässt sich die Impedanz errechnen, Beispiel hier

$$Z_0 = \sqrt{107 \times 50} = 73,14 \Omega$$

Das zu messende Beispiel-Kabel hat lt. Aufdruck 75 Ω Impedanz. Die gemessene Abweichung liegt aber durchaus in der Fertigungstoleranz solcher Kabel; auch RG 58 liegt je nach Herstellerqualität und mechanischer Vorbelastung (knicken, biegen, pressen) zwischen 48 Ω und 52 Ω .

Diese Messmethode lässt sich auch mit dem NanoVNA in gleicher Form mit gleichem Ergebnis durchführen.

$$Z_0 = \sqrt{107 \times 50} = 73,14 \Omega$$



Bei der Impedanzermittlung bei Flachbandkabeln (Feeder, Hühnerleiter) haben mich die vorgestellten Methoden nicht weiter gebracht. Sobald ich da eine ausreichend genaue Messmöglichkeit gefunden habe, werde ich diesen Bericht ergänzen.

Über Rückfragen, Anmerkungen, Verbesserungsvorschläge würde ich mich freuen.

Kontakt bitte per Mail dl6dca@darcd.de oder Ortsfrequenz 144,575 MHz.

vy 73 de Wilhelm, DL6DCA