

Messungen der Parameter von Koaxialkabeln mit Amateurmitteln

Reinhard Noll, DF1RN

Die Fa. Kabel Kusch, Dortmund, hat unserem DARC Ortsverband Aachen, G01, ein ca. 100 m langes UltraFlex 7 Koaxialkabel des Herstellers Messi & Paoloni zur Verfügung gestellt. An einem Kabelende ist ein N-Stecker (N-m), am anderen Ende ein BNC-Stecker montiert.

Tabelle 1 zeigt die spezifizierten Dämpfungswerte im Frequenzbereich von 1,8 bis 1296 MHz [1]. Diese Daten sind in Bild 1 als offene schwarze Kreise eingetragen. Aufgetragen ist die Dämpfung in Dezibel pro 100 m Kabellänge über der Frequenz in doppellogarithmischer Darstellung.

Tab. 1: Daten des Koaxialkabels UltraFlex 7 und gemessene Dämpfung in dB/100 m für Frequenzen von 1,8 bis 1296 MHz aus einer Messung des Vorwärts-Transmissionsfaktors S_{21} und einer Messung des Eingangsreflexionsfaktors S_{11} bei offenem Ende des Koaxialkabels

Frequenz [MHz]	spezifizierte Dämpfung [1] [dB/100 m]	gemessene Dämpfung S_{21} [dB/100 m]	gemessene Dämpfung S_{11} [dB/100 m]
1,8	0,95	1,04	1,0
3,5	1,28	1,39	1,5
7	1,6	1,86	1,9
10	1,9	2,13	2,2
14	2,2	2,44	2,4
21	2,6	2,89	2,7
28	3,00	3,24	3,6
50	4,00	4,19	4,0
100	5,80	5,95	6,0
144	6,90	7,24	6,6
200	8,20	8,62	8,7
400	11,80	12,48	13,0
430	12,30	12,90	14,2
800	17,10	18,25	-
1000	19,30	20,33	-
1296	22,33	24,48	-

Mit dem vektoriellen Netzwerkanalysator VNWA habe ich die Dämpfung gemessen [2]. Die Einstellungen des VNWA sind im Anhang in Tab. A.1 aufgeführt. Für die Messung des Vorwärts-Transmissionsfaktors S_{21} wird das UltraFlex 7 Kabel über einen BNC-f zu SMA-f Adapter an den SMA-m Stecker des TX-Kabels (RG 223, 19,5 cm), das zum Ausgang des VNWA führt, angeschlossen. Das andere Ende des Kabels wird über einen N-f N-f Adapter und einen N-m SMA-f Adapter mit dem SMA-m Winkelstecker des RX-Kabels (RG 223, 19,5 cm) verbunden, das zum Eingang des VNWA führt. Bei der Messung des Eingangsreflexionsfaktors S_{11} bleibt das Ende offen.

Die geometrische Länge des UltraFlex 7 Kabels inklusive angeschlossenen Steckern habe ich mit Unterstützung durch meinem Sohn Leonhard mit einem Stahlbandmaß gemessen, sie beträgt 99,78 m. Mit Manfred Jost, DH0KAI, und einem Kunststoffbandmaß haben wir die Länge nochmals bestimmt, Ergebnis: 99,76 cm. Die relative Abweichung beträgt nur $2 \text{ cm}/10^4 \text{ cm} = 2 \times 10^{-4}$. Das sind lediglich Bruchteile eines Promilles und in jedem Falle ist dies hinreichend präzise im Vergleich zu den anderen elektrischen Messungen.

Die gemessene Dämpfung S_{21} wird auf 100 m Länge umgerechnet und ist in der dritten Spalte in Tab. 1 eingetragen. Bis zu Frequenzen von 430 MHz liegen die Messwerte um

maximal 0,7 dB/100 m über den spezifizierten Werten. Dabei sind natürlich auch die Verluste an den zusätzlichen Steckverbindungen zu berücksichtigen (insgesamt 5; da 2 Steckverbindungen ja ohnehin für die VNWA Kalibrierung "Thru" verwendet werden, also 3 zusätzliche). Bis 1,3 GHz steigt die Dämpfung auf Werte an, die bei der höchsten Frequenz um 2,2 B/100 m über den spezifizierten Kabelwerten liegen. Die Daten der S_{21} -Messung sind als offene blaue Quadrate in Bild 1 aufgetragen.

Für die Messung des Eingangsreflexionsfaktors S_{11} wird das andere Kabelende offen gelassen und bei der Umrechnung auf die Dämpfung eines 100 m Kabels berücksichtigt, dass bei S_{11} das Kabel zweimal durchlaufen wird. Die Ergebnisse sind in der vierten Spalte in Tab. 1 aufgelistet und als rote Dreiecke in Bild 1 eingezeichnet. Bei Frequenzen oberhalb von 430 MHz sind die am Eingang wieder ankommenden Signalpegel nach einer Laufstrecke von 2×100 m zu gering, um sie mit dem gewählten Messaufbau sicher erfassen zu können. Daher endet die Datenreihe für die S_{11} -Messung bei einer Frequenz von 430 MHz.

Die Ergebnisse der beiden Messungen weichen bis zu Frequenzen von 400 MHz um weniger als 0,6 dB/100 m voneinander ab.

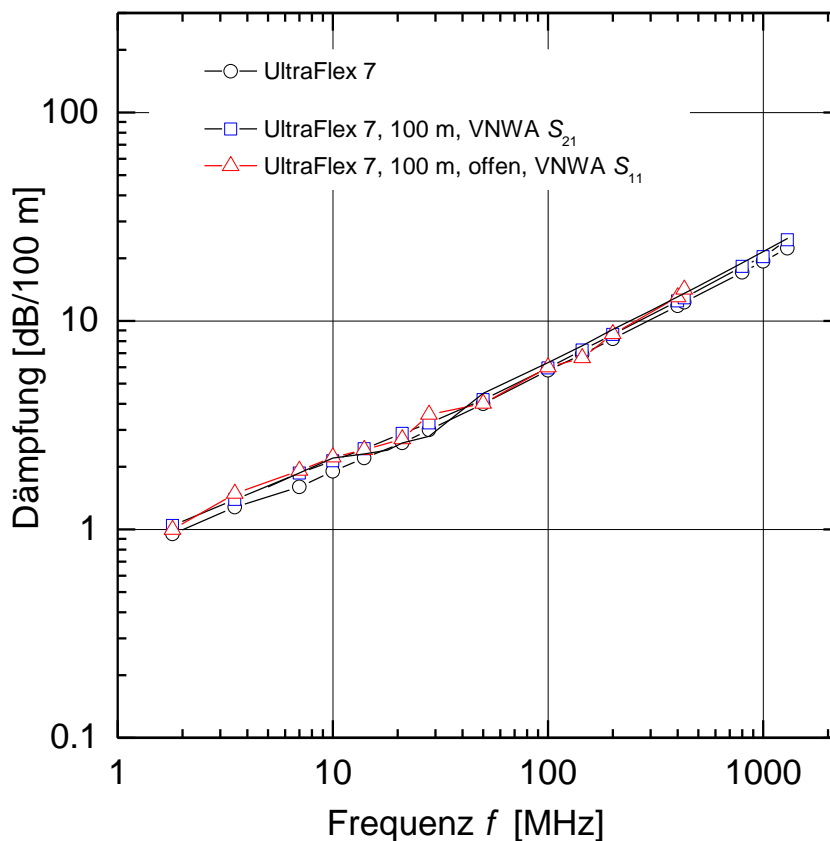


Bild 1: Spezifizierte und gemessene Dämpfung des UltraFlex 7 Kabels in dB/100 m im Frequenzbereich von 1,8 bis 1296 MHz. Gemessen wurde an einem Kabel mit einer geometrischen Länge von 99,78 m. Runde Datenpunkte: spezifizierte Daten [1], viereckige Datenpunkte: aus der Messung des Vorwärts-Transformationsfaktors S_{21} ermittelte Dämpfung, dreieckige Datenpunkte: aus der Messung des Eingangs-Reflexionsfaktors S_{11} ermittelte Dämpfung bei offenem Kabelende

Der Verkürzungsfaktor (VF) eines Koaxialkabels beschreibt das Verhältnis der Phasengeschwindigkeit einer Welle auf einer Leitung zur Vakuumlichtgeschwindigkeit. Für das untersuchte UltraFlex 7 Kabel wird $VF = 0,83$ angegeben [1]. Mit der Funktion "Time Domain Reflectometry" (TDR) – auch als Zeitbereichsreflektometrie bezeichnet – des VNWA habe ich die Länge des Kabels bestimmt (in Tab. A.1 sind die Einstellparameter für diesen

Messmodus angegeben). Das UltraFlex 7 ist dabei mit der BNC-Seite an das TX-Kabel des VNWA angeschlossen, das andere Ende bleibt offen (offener N-m Stecker). Bei der Zeitbereichsreflektometrie wird üblicherweise eine Folge kurzer Nadelimpulse in ein zu prüfendes Koaxialkabel eingespeist. Diese Impulse werden an lokalen Veränderungen des Wellenwiderstands teilweise reflektiert und laufen wieder zum Einspeiseort zurück. Aus der Messung der Laufzeit, kann bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit, auf den Ort der lokalen Wellenwiderstandsänderungen geschlossen werden. Bei der hier gezeigten Messung ist dieser Ort das offene Kabelende an dem der Wellenwiderstand sich von 50Ω auf einen sehr großen Wert, im Idealfall unendlich, erhöht. Der Netzwerkanalysator VNWA kann jedoch keine Impulse im Zeitbereich messen, aber er ist in der Lage, Messungen über einen weiten Frequenzbereich durchzuführen und diese mit einer inversen Fouriertransformation (FFT) wieder in den Zeitbereich zu übertragen.

Bild 2 zeigt das Ergebnis der TDR Messung am Ultraflex 7 Kabel mit dem VNWA. Aufgetragen sind die rücklaufenden Signalpegel als Funktion der Zeit im Bereich von 0 ns bis 850 ns. Marker 1 zeigt auf ein Maximum bei 0 ns entsprechend dem einlaufenden Impuls; Marker 2 zeigt die zeitliche Lage des am offenen Kabelende reflektierten Impulses. Die Zeitdifferenz zwischen diesen beiden Markern beträgt 776.1 ns. Bei bekannten Verkürzungsfaktor VF kann damit die Länge ermittelt werden. Wir wollen hier umgekehrt vorgehen, da wir die Länge des Kabels ja recht präzise gemessen haben, geben wir diese vor und variieren in der Softwaremaske "Time Domain Settings" des VNWA den Verkürzungsfaktor so, dass mit der gemessenen Verzögerungszeit (Delay) eine berechnete geometrische Länge des Kabels ermittelt wird, die der tatsächlich gemessenen Länge von 99,78 m entspricht. Danach ergibt sich für den Verkürzungsfaktor $VF = 0,8577$. Mit dem angezeigten Delay von $\tau = 776,10$ ns - siehe Bild 2 - resultiert für die Kabellänge (c_0 Vakuumlichtgeschwindigkeit, 299792458 m/s):

$$l = c_0 \cdot V \cdot \tau / 2 = 99,78 \text{ m} . \quad (1)$$

Dieser Wert von $VF \approx 0,858$ liegt um etwa 3,3 % oberhalb der spezifizierten Angabe von [1].

Um zu prüfen, ob der ermittelte Wert für VF richtig ist, habe ich ergänzend mit einem Zweistrahloszilloskop (Tektronix 7844) und einem Rechteckimpulsgenerator (DDS 20 G, Impulsfrequenz 1 MHz) die Kabellaufzeit gemessen (TDR Methode, s.o.). Dazu wird das Ausgangssignal des DDS 20 G über einen BNC-T-Verbinder aufgeteilt. Ein Ausgang des T-Verbinders führt über ein kurzes RG 58 Koaxialkabel definierter Länge direkt auf den Eingang 1 des Oszilloskops, der andere über das UltraFlex 7 Kabel mit einem daran angeschlossenen kurzen RG 58 Koaxialkabel gleicher Länge auf Eingang 2. Der durch das lange UltraFlex 7 Kabel laufende Rechteckimpuls zeigt deutlich den Einfluss der Tiefpasswirkung des Kabels. Die am Bildschirm bei etwa 10 % des Maximalwerts abgelesene Zeitverschiebung zwischen den ansteigenden Flanken über den langen und kurzen Kabelweg beträgt 383 ns. Daraus resultiert ein Verkürzungsfaktor von:

$$V = 99,78 \text{ m} / (383 \text{ ns} \cdot c_0) = 0,869 \quad (2)$$

der ca. 1,3 % über dem Wert liegt, der mit dem VNWA ermittelt wurde.

In einer dritten Variante habe ich das UltraFlex 7 Kabel am Ende kurzgeschlossen (mit N-f auf SMA-f Adapter und dann SMA-m Kurzschluss) und mit dem VNWA die Eingangsimpedanz $|Z|$ des Kabels als Funktion der Frequenz gemessen. Diese nimmt mit steigender Frequenz periodisch eine Reihe von Maxima an entsprechend den ungeraden Vielfachen von $\lambda/4$ -Wellenlängen auf der Leitung. Wegen der großen Kabellänge liegen die Maxima dicht beieinander (Abstand zwischen zwei benachbarten Maxima beträgt ca. 1,3 MHz), sodass diese nicht in einem Gesamtsweep über 1,3 GHz darstellbar sind. Daher habe ich eine Kalibrierung des VNWA in einem Frequenzbereich von 300 bis 500 MHz gewählt

(mit 4000 Punkten). Bild 3 zeigt die Eingangsimpedanz $|Z|$ als Funktion der Frequenz, eine Reihe von Maxima abnehmender Amplitude folgt aufeinander. Aus der Frequenzdifferenz Δf zweier benachbarter Maxima kann der Verkürzungsfaktor berechnet werden:

$$VF = \frac{2 \Delta f l}{c_0} \quad (3)$$

Diese Frequenzdifferenz können wir genauer bestimmen, wenn wir nicht das nächste, sondern z.B. das n -te Maximum nehmen:

$$V = \frac{2 \Delta f_n l}{n c_0}, \quad (4)$$

wobei Δf_n den Frequenzabstand zwischen der 0. Resonanz (erster Marker) und der n -ten Resonanz bezeichnet. Dazu zoomen wir in das Bild 3 hinein, um den Frequenzabstand über z.B. 110+1 Maxima zu bestimmen. Die Positionen der Frequenzmarker sind: 322,666 MHz und 464,499 MHz (die Nachkommastellen können abgelesen werden, wenn auf den Marker in der GUI des VNWA doppelt geklickt wird). Die schwarzen Pfeile zeigen die Zählweise für n an, für das erste Maximum rechts neben dem Frequenzmarker 1 gilt $n = 1$. Mit $n = 110$ folgt dann für den Verkürzungsfaktor $VF = 0,8583$. Dieser Wert liegt sehr nahe an demjenigen, der mit dem VNWA im TDR Messmodus bestimmt wurde. Bild 4 zeigt eine entsprechende Messung im Frequenzbereich von 1 MHz bis 60 MHz. In diesem Fall beträgt $n = 38$ und für den Verkürzungsfaktor erhalten wir: $VF = 0,8561$. Eine mehrmalige Messung des Verkürzungsfaktors (mit n zwischen 38 und 127 und in verschiedenen Frequenzbereichen, die insgesamt eine Spanne von 0,05 MHz bis 1300 MHz umfassen) ergibt: $VF = 0,857 \pm 0,001$.

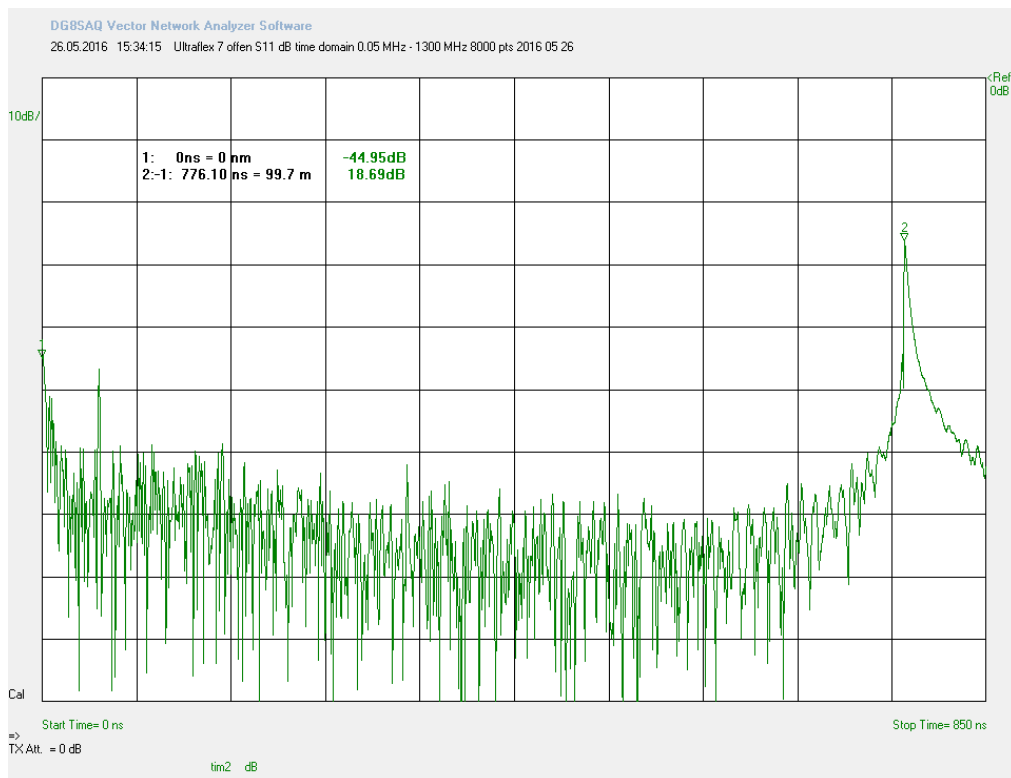


Bild 2: VNWA Messung am offenen UltraFlex 7 Kabel im Messmodus "Time Domain Reflectometry". Dargestellt ist die Messung von tim2 (grüne Kurve) in dB. Aufgetragen sind die zurücklaufenden Signalpegel als Funktion der Zeit im Bereich von 0 bis 850 ns (grüne Kurve). Die Zeitdifferenz zwischen Marker 2 auf dem Maximum rechts – entsprechend der Reflexion am offenen Kabelende – und dem Marker 1 am Bildrand links beträgt 776,10 ns

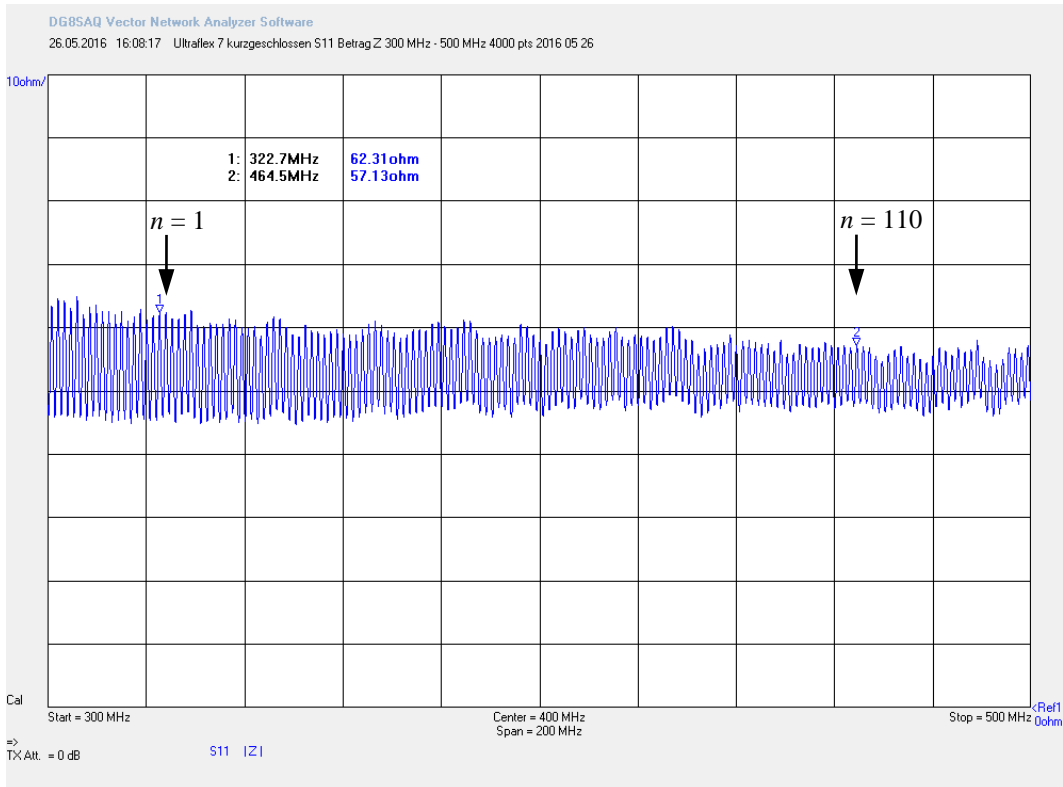


Bild 3: Betrag der Eingangsimpedanz des kurzgeschlossenen UltraFlex 7 Kabels für Frequenzen von 300 bis 500 MHz. Die schwarzen Pfeile zeigen die Zählvariable n , vgl. Beziehung (4)

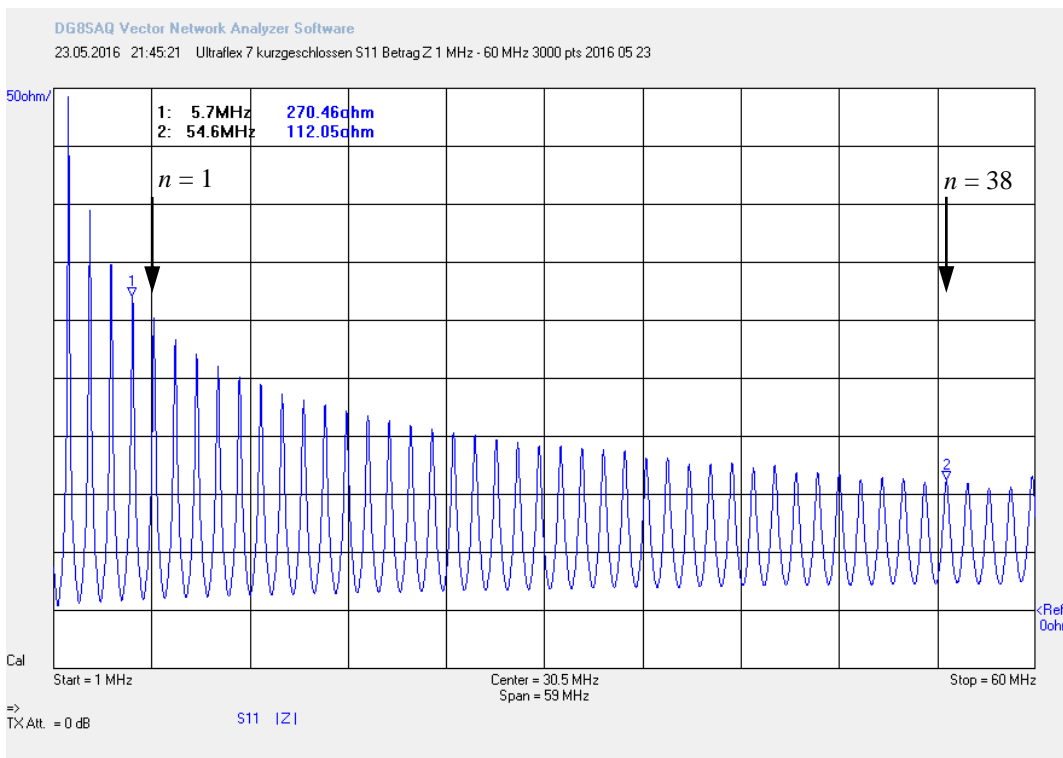


Bild 4: Betrag der Eingangsimpedanz des kurzgeschlossenen UltraFlex 7 Kabels für Frequenzen von 1 bis 60 MHz. Die schwarzen Pfeile zeigen die Zählvariable n , vgl. Beziehung (4)

Die Ergebnisse der Messungen des Verkürzungsfaktors des UltraFlex 7 Kabels sind in Tab. 2 zusammengefasst.

Tab. 2: Mit verschiedenen Methoden gemessener Verkürzungsfaktor des Koaxialkabels UltraFlex 7

Messmethode	VF [1]	Bemerkung
TDR	0,858	VNWA Messung im Frequenzbereich
Impulslaufzeit	0,869	mit Rechteckimpulsen im Zeitbereich gemessen
$S_{11}, Z $	0,858	im Frequenzbereich von 300 bis 500 MHz
$S_{11}, Z $	0,857±0,001	Mittelwert in verschiedenen Frequenzbereichen zwischen 0,05 MHz und 1300 MHz

Der Wellenwiderstand des Kabels kann wie folgt berechnet werden:

$$Z = \frac{1}{2l\Delta f C'} \quad (5)$$

mit l geometrische Kabellänge, Δf Frequenzabstand zwischen zwei benachbarten Maxima der Eingangsimpedanz (vgl. (3)), C' Kapazitätsbelag des Kabels.

Der mittlere aus vier Messungen ermittelte Frequenzabstand zwischen zwei Maxima der Eingangsimpedanz beträgt: $\Delta f = (1,2879 \pm 0,0014)$ MHz.

Tabelle 3 zeigt die Ergebnisse der Messung des Kapazitätsbelags des offenen UltraFlex 7 Kabels mit zwei verschiedenen Messgeräten (R&S KRT BN 5100 von der Clubstation unseres OV, PeakTech 3315 des Autors). Dabei wurde bei der Messung mit dem PeakTech die Kapazität der Anschlussleitungen zwischen Koaxialkabel und Messgerät in einer Messung ohne das Koaxialkabel ermittelt und als Offset-Wert von dem späteren Ergebnis in Abzug gebracht. Um die Funktionstüchtigkeit des R&S Geräts noch einmal unabhängig zu prüfen, hat Hans Jürgen Riehl, DH1KAE, aus unserem OV, einen Styroflexkondensator mit einem Systron Donner Gerät als "Bezugsnormal" vermessen, Ergebnis: 9394 pF. Diesen Styroflexkondensator haben wir mit dem R&S Gerät auf der Clubstation G01 gemessen, Ergebnis: 9400 pF. Das ist eine sehr gute Übereinstimmung. Die Messung dieses Kondensators mit dem PeakTech Gerät ergibt: 9524 pF. Nehmen wir den Bezugswert von 9394 pF als korrekt an und gehen von einer relativen Abweichung aus, so wäre die Anzeige des PeakTech-Geräts mit dem Faktor $9394 \text{ pF} / 9524 \text{ pF} = 0,9759$ zu multiplizieren. Das ist der in der in Tab. 3 angegebene Wert C_{korrr} für das PeakTech Gerät. Der ermittelte Wellenwiderstand liegt mit beiden Messgeräten recht dicht beieinander. Der Mittelwert beträgt 53,29 Ω . Dieser Wert liegt etwas außerhalb des von Messi & Paolini spezifizierten Toleranzrahmens: $(50 \pm 3) \Omega$ [1].

Tab. 3: Mit verschiedenen Geräten gemessene Kapazität des offenen UltraFlex 7 Kabels und daraus mit der Beziehung (5) berechneter Wellenwiderstand

Messgerät	Rhode & Schwarz KRT BN 5100, DB0BAC	PeakTech 3315, DF1RN	Bemerkung
spezifizierte Genauigkeit [%]	1*	4	
C [pF]	7300	7370	
C_{korrr} [pF]		7269,4	korrigiert mit dem Verhältnis 9394 pF/9524 pF
C' [pF/m]	73,16	72,85	Kapazitätsbelag
Z [Ω]	53,18	53,41	Berechnung mit (5)

*bei $\tan \delta \leq 2 \times 10^{-2}$

Zur Probe habe ich diesselbe Methode nochmal mit einem RG 58 C/U MIL C-17 Kabel mit einer Länge von $l = 20,048$ m durchgeführt. Für den Abstand zwischen aufeinanderfolgenden Maxima des Betrags der Eingangsimpedanz wird folgender Wert gemessen: $\Delta f = 4,992$ MHz. Das PeakTech Gerät liefert für das offene RG 58 Kabel eine Kapazität von $C_{\text{kor}} = 1,997$ nF (mit Korrektur nach dem Bezugsnorm, siehe oben). Daraus folgt ein Kapazitätsbelag von $C' = 99,611$ pF/m. Mit der Beziehung (5) resultiert damit ein Wellenwiderstand von $Z = 50,85 \Omega$, der dem Idealwert sehr nahe kommt und gut innerhalb des spezifizierten Bereichs für solche Kabel von $(50 \pm 2) \Omega$ liegt [3].

Fazit

Für ein etwa 100 m langes UltraFlex 7 Kabel wurde die Dämpfung im Frequenzbereich von 1,8 MHz bis 1296 MHz mit einem Netzwerkanalysator in zwei Varianten – über den Vorwärts-Transmissionsfaktor und den Eingangsreflexionsfaktor – gemessen. Sie stimmt im untersuchten Frequenzbereich im wesentlichen mit den spezifizierten Werten überein.

Mit mehreren Methoden wurde der Verkürzungsfaktor dieses Kabels bestimmt. Der Mittelwert aus TDR, Impulslaufzeit und S_{11} , $|Z|$ Messung liegt bei: $VF = 0.861 \pm 0.007$.

Dieser Wert liegt etwa 3,8 % über dem spezifizierten Wert von 0,83. Vermutlich ist dies eine Folge von Toleranzen bei der Herstellung des Zell-Polyethylens (in [1] als "foamed polyethylene" angegeben), das als Dielektrikum des UltraFlex 7 dient.

Der Wellenwiderstand liegt bei knapp $53,3 \Omega$.

Die vorgestellten Messungen zeigen, dass mit Amateurmitteln wesentliche Eigenschaften von Koaxialkabeln recht präzise gemessen werden können

27.5.2018, Reinhard, DF1RN

Bezugsdokumente

- [1] Broschüre der Fa. Messi & Paoloni srl, Via G. conti 1, 60131 Ancona, www.messi.it, S. 10, Attenuation at 20 °C. Dort sind Dämpfungswerte in dB/100 m für Frequenzen bis 8000 MHz angegeben. Hier werden nur die Werte bis 1296 MHz betrachtet, die mit dem Netzwerkanalysator VNWA v2 erfasst werden können.
- [2] v2, VNWA 2.6, SDR-Kits, 13312/01-1573
- [3] <http://www.westernwire.org/CoaxSpecs/WRG05807.pdf>

Anhang

Tab. A.1: Daten und Einstellungen des VNWA

	Daten
Netzwerkanalysator	v2, VNWA 2.6, SDR-Kits, 13312/01-1573
Anschlussleitungen	2x RG 223, jeweils 19,5 cm, an TX und RX SMA-f Buchsen des VNWA angeschlossen, jeweils am anderen Ende mit 90° SMA-f Buchsen
Kalibrierung	SOLT, verwendete Komponenten: SMA-f - SMA-f Verbinder; 50 Ω Abschluss: SMA-m, Amphenol Connex; Kurzschluss: SMA-m, Amphenol; Kalibrierebene: in der Mitte des SMA-f - SMA-f

	Verbinders
Frequenzbereich der Kalibrierung	0,05 MHz - 1300 MHz
Messpunkte	8000
Integrationszeit pro Messpunkt	1.33 ms, time per sweep: 10,67 s
Time Domain Settings	S ₁₁ , impulse DFT (discrete Fourier transform), mode: lowpass, window type: rectangular, impulse response: normalized to impulse height, low frequency data: extrapolated below 25 kHz
Betriebssystem, Einstellung Aufnahmepegel	Windows 7 Professional, Start\Systemsteuerung\Hardware und Sound\Sound\Aufnahme\Mikrofon (2-USB Audio Codec Standardgerät)\Pegel. Einstellung: 3
