

Messungen am Koaxialkabel H 2007

Bei Kabel Kusch, Dortmund, habe ich ein H 2007 Koaxialkabel gekauft, das an einer Seite einen N-Stecker und an der anderen einen BNC-Stecker hat [1]. Tabelle 1 zeigt die spezifizierten Dämpfungswerte im Frequenzbereich von 5 bis 1298 MHz [1]. Diese Daten sind in Bild 1 als offenen schwarze Kreise eingetragen.

Tab. 1: Daten des Koaxialkabels H 2007 und Messergebnisse

Frequenz [MHz]	spezifizierte Dämpfung [1] [dB/100 m]	gemessene Dämpfung S_{21} [dB/100 m]	gemessene Dämpfung S_{11} [dB/100 m]
5	1.6	1.7	2.1
10	2.2	2.3	2.1
14	2.3	2.5	2.7
18	2.4	2.9	2.7
21	2.6	3.1	3.4
28	2.8	3.5	3.5
50	4.5	4.8	4.8
100	6.3	6.9	6.9
144	7.6	8.3	8.2
200	9.1	9.8	9.9
300	11.2	12.3	12.1
432	13.6	14.8	14.3
500	14.7	15.8	15.7
800	19.0	20.9	18.6
1000	21.5	23.7	24.7
1298	24.9	27.9	27.8

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 H 2007 Kabel über einen BNC-f zu SMA-f Adapter an den SMA-m Stecker des TX-Kabels des VNWA angeschlossen. Das andere Ende des H 2007 Kabels wird über einen N-f N-f Adapter und einen N-m SMA-f Adapter mit dem SMA-m Winkelstecker des RX-Kabels verbunden.

Die geometrische Länge des Kabels inklusive angeschlossenen Steckern habe ich mit einem Stahlmaßband gemessen, sie beträgt 15.15 m. 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 200 MHz liegen die Messwert um maximal 0.7 dB über den spezifizierten Werten. Dabei sind natürlich auch die Verluste an den zusätzlichen Steckverbindungen zu berücksichtigen (insgesamt 5). Bis zu Frequenzen von 1.3 GHz steigt die Dämpfung auf Werte an, die bis zu 3 dB über den spezifizierten Kabelwerten liegen. Die Messdaten 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. Die Ergebnisse der beiden Messungen stimmen im wesentlichen miteinander überein.

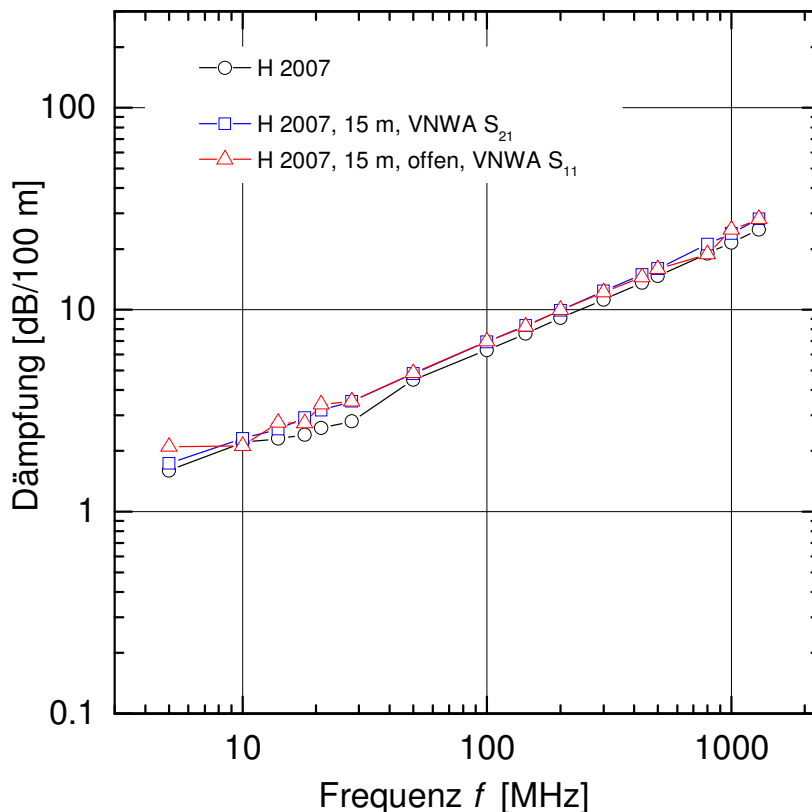


Bild 1: Spezifizierte und gemessene Dämpfung des Kabels H 2007 im Frequenzbereich von 5 bis 1300 MHz. Gemessen wurde an einem Kabel mit einer geometrischen Länge von 15.15 m

Als Verkürzungsfaktor wird 0.83 angegeben [1]. Mit der Funktion "Time Domain Reflectometry" (TDR) des VNWA habe ich die Länge des Kabels bestimmt (in Tab. A.1 sind die Einstellparameter für diesen Messmodus angegeben). Das H 2007 ist dabei mit der BNC-Seite an das TX-Kabel des VNWA angeschlossen, das andere Ende bleibt offen (offener N-m Stecker). Bild 2 zeigt das Ergebnis.

Den Verkürzungsfaktor (engl. velocity factor) habe ich in der Softwaremaske "Time Domain Settings" so variiert, dass als Verzögerungszeit (Delay) ein Wert ermittelt wird bei dem die berechnete geometrische Länge der tatsächlich gemessenen Länge von 15.15 m entspricht. Danach ergibt sich für den Verkürzungsfaktor $V = 0.79$. Mit dem angezeigten Delay von $\tau = 127.92$ ns - siehe Bild 2 - resultiert für die Kabellänge (c_0 Vakuumlichtgeschwindigkeit, 299792458 m/s):

$$l = c_0 \cdot V \cdot \tau / 2 = 15.15 \text{ m.} \quad (1)$$

Dieser Wert von $V = 0.79$ liegt um etwa 4.8 % unterhalb der spezifizierten Angabe von [1].

Die Messungen mit der Time Domain Reflectometry reagieren sehr empfindlich auf die Kabellänge. Wird an das offene Ende noch ein N-f N-f Adapter mit N-m SMA-f Adapter geschraubt, so erhöht sich die Delayzeit auf 128.27 ns, das sind $128.27 \text{ ns} - 127.92 \text{ ns} = 350$ ps mehr für eine zusätzliche Länge von ca. 40 mm.

Um zu prüfen, ob der ermittelte Wert für V richtig ist, habe ich ergänzend mit einem Zweistrahloszilloskop (Tektronix 7844) und einem Rechteckimpulsgenerator (DDS 20 G) die Kabellaufzeit gemessen, Ergebnis: 64 ns. Daraus resultiert ein Verkürzungsfaktor von:

$$V = 15.15 \text{ m} / (64 \text{ ns} \cdot c_0) = 0.7895, \quad (2)$$

der mit dem VNWA-Wert sehr gut übereinstimmt.

In einer dritten Variante habe ich das H 2007 Kabel am Ende kurzgeschlossen (mit N-f auf SMA-f Adapter und dann SMA-m Kurzschluss) und mit dem VNWA die Impedanz $|Z|$ als Funktion der Frequenz gemessen, siehe Bild 3. Die Impedanz zeigt eine Reihe von Maxima. Aus der Frequenz zweier aufeinanderfolgender Maxima kann der Verkürzungsfaktor berechnet werden:

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

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

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

Dazu zoomen wir in das Bild 3 hinein, um den Frequenzabstand über z.B. 25 Maxima zu bestimmen. Bild 4 zeigt den vergrößerten Frequenzabschnitt und die beiden blauen Marker bei den Frequenzen 245.167 MHz (die Nachkommastellen können abgelesen werden, wenn auf den Marker doppelt geklickt wird) und 440.170 MHz. Die schwarzen Pfeile zeigen die Zählweise für n an, für das erste Maximum rechts neben dem blauen Frequenzmarker 1 gilt $n = 1$. Mit $n = 25$ folgt dann für den Verkürzungsfaktor $V = 0.7884$, wie wir es auch zuvor schon erhalten hatten.

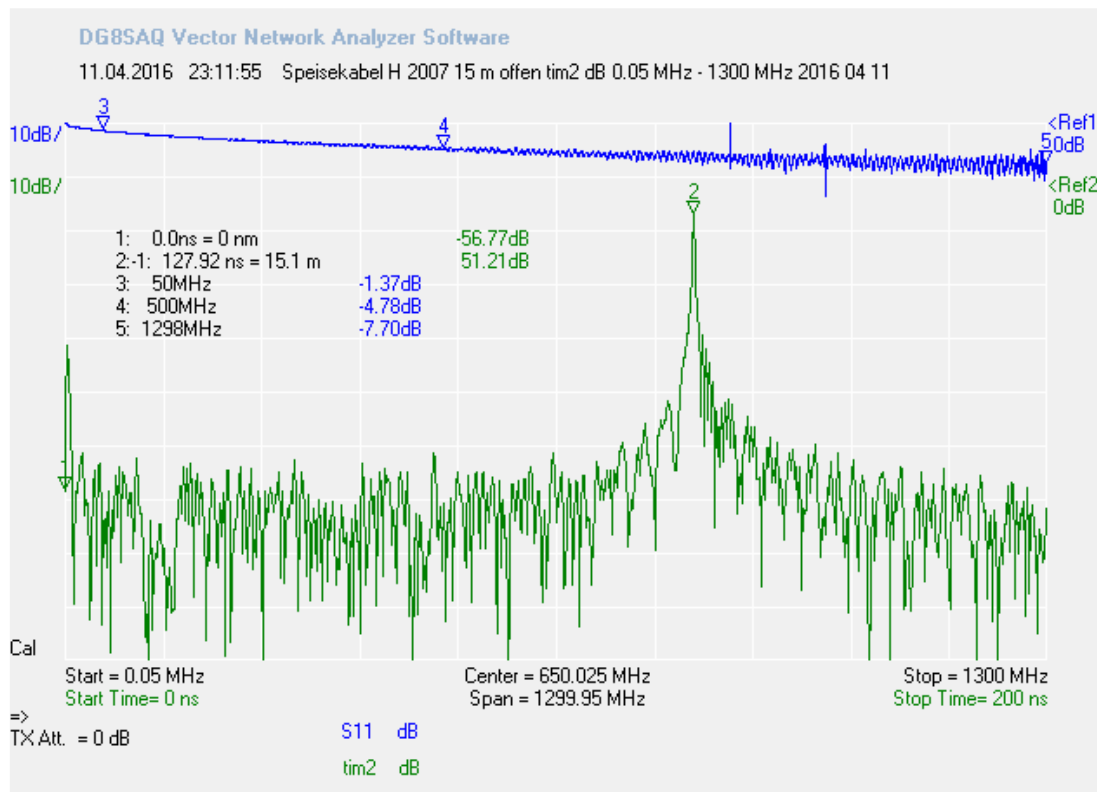


Bild 2: VNWA Messung am offenen H 2007 Kabel im Messmodus "Time Domain Reflectometry". Dargestellt sind die Messungen von S_{11} in dB (blaue Kurve) sowie tim2 (grüne Kurve). Die Zeitdifferenz zwischen dem Marker 2 und dem Marker 1 beträgt 127.92 ns

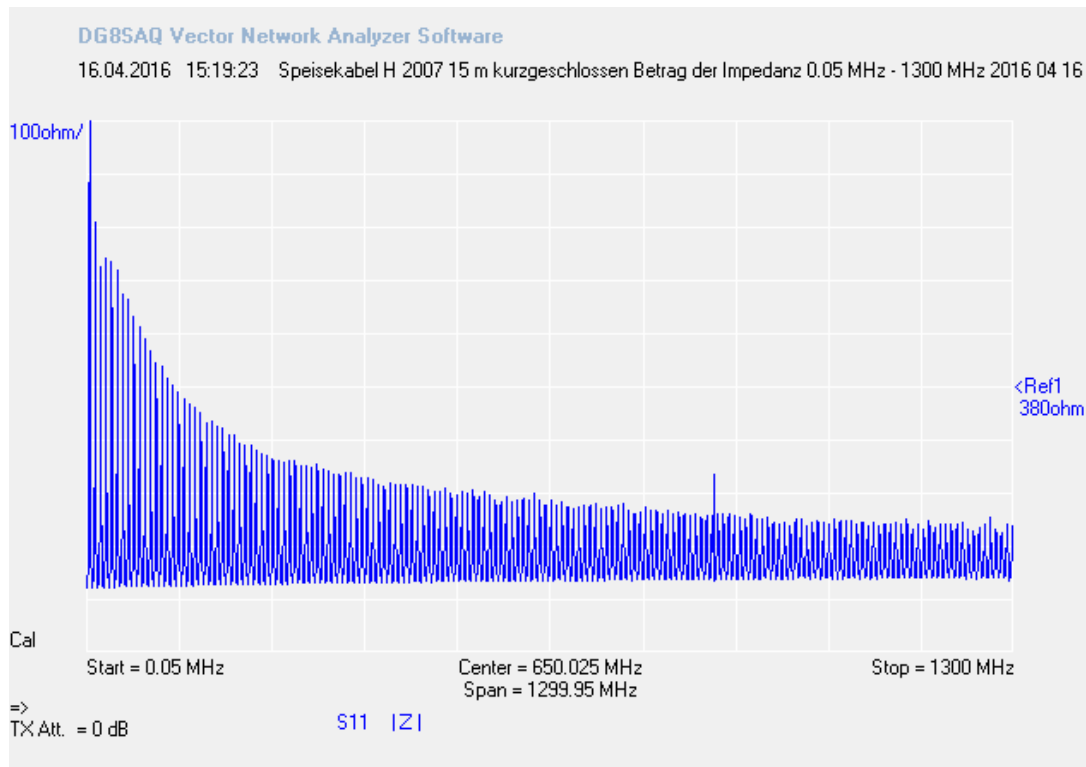


Bild 3: Betrag der Eingangsimpedanz des kurzgeschlossenen Kabels für Frequenzen von 0.05 bis 1300 MHz

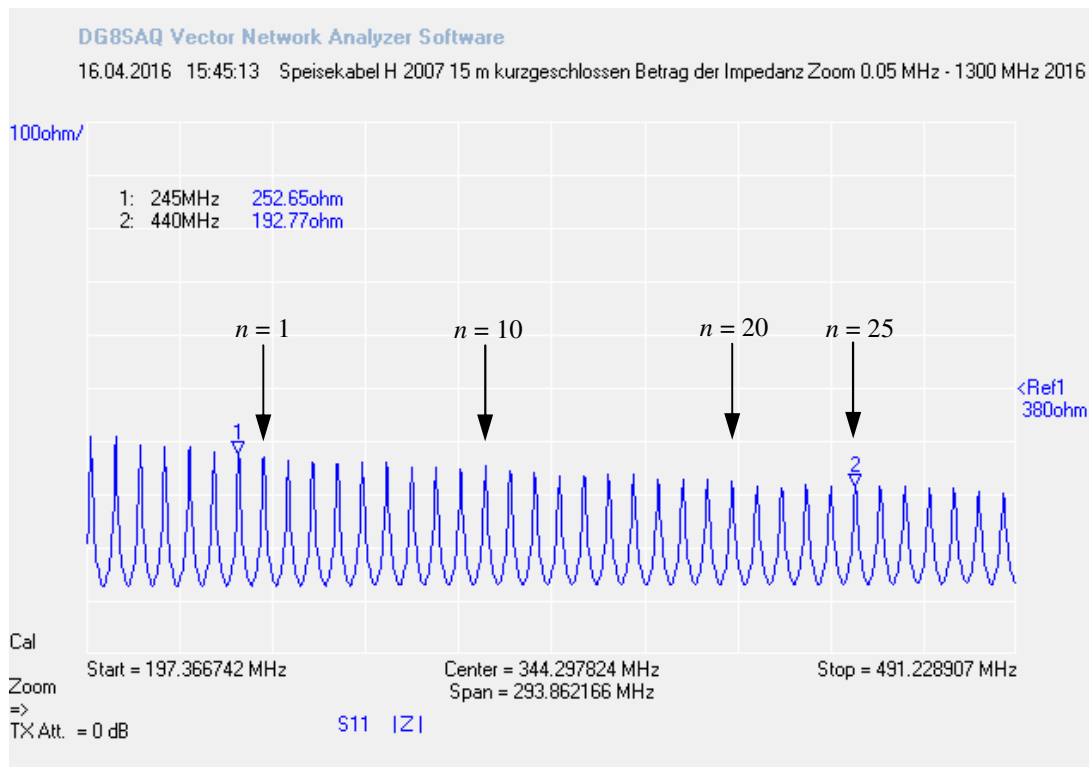


Bild 4: Detailvergrößerung von Bild 3 im Frequenzbereich von 197 bis 491 MHz

In einer Vergleichstabelle für Koaxialkabel bei [1] findet sich für den Verkürzungsfaktor des H 2007 Kabels die Angabe "0,83 @ 1GHz", die offenbar bedeuten soll, dass der

Verkürzungsfaktor bei einer Frequenz von 1 GHz gemessen wurde. Daher habe ich die Messung der Eingangsimpedanz $|Z|$ bei kurzgeschlossenem Kabel erneut für eine Kalibrierung des VNWA im Frequenzbereich von 900 MHz bis 1100 MHz durchgeführt. Bild 5 zeigt das Ergebnis. Mit den Frequenzen der beiden blauen Marker, 915.5268 MHz und 1087.061 MHz, $n = 22$, folgt mit (4): $V = 0.7880$. Eine Frequenzabhängigkeit des Verkürzungsfaktors ist nicht festzustellen. Insoweit macht die Angabe "0,83 @ 1GHz" keinen Sinn.

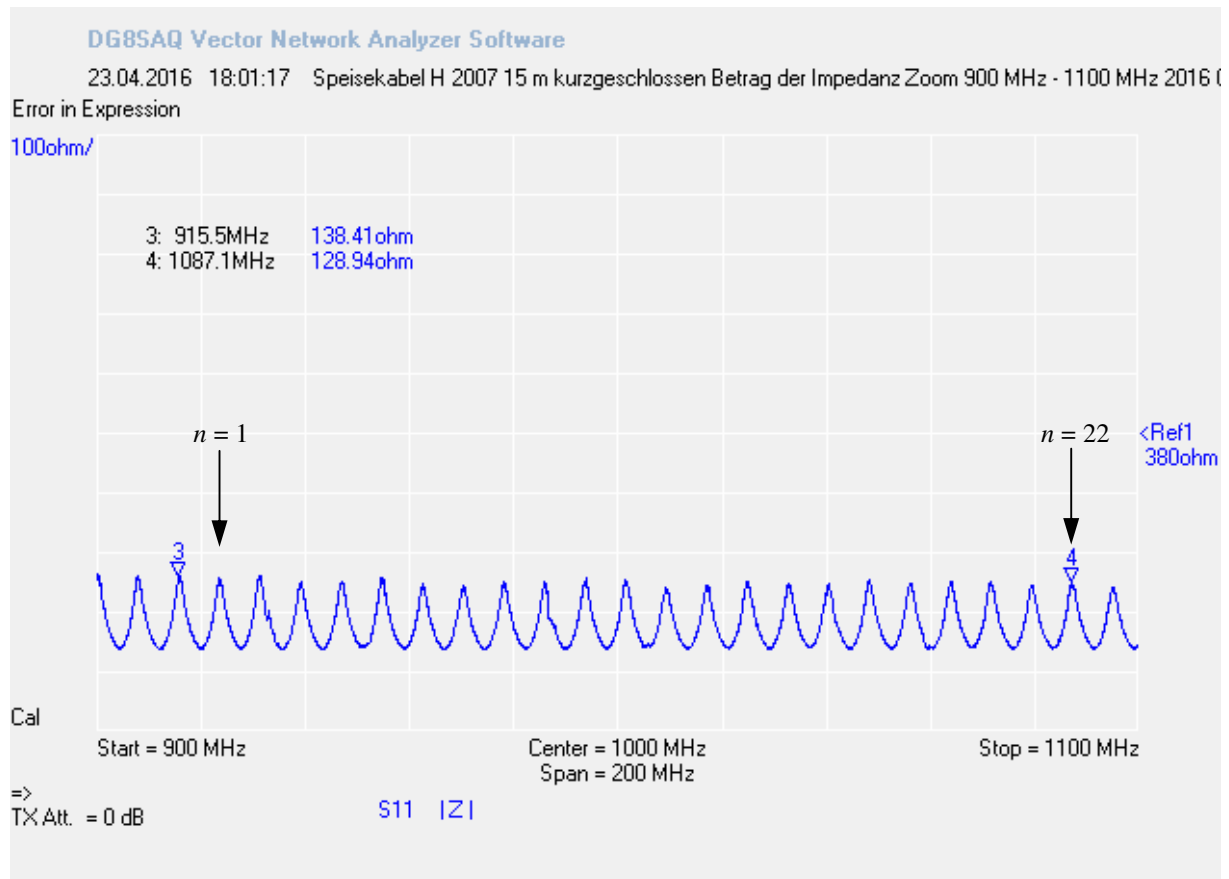


Bild 5: Betrag der Eingangsimpedanz des kurzgeschlossenen Kabels H 2007 für Frequenzen von 900 bis 1100 MHz. Gemessen wird die Frequenzdifferenz zwischen den beiden blauen Markern 3 und 4. Die schwarzen Pfeile zeigen die Zählvariable n

Die Ergebnisse der Messungen des Verkürzungsfaktors des H 2007 Kabels sind in Tab. 2 zusammengefaßt. Der Mittelwert dieser vier Messungen und die Standardabweichung sind: $V = 0.789 \pm 0.001$.

Tab. 2: Mit verschiedenen Methoden gemessener Verkürzungsfaktor des Koaxialkabels H 2007

Messmethode	$V[1]$	Bemerkung
TDR	0.79	
Impulslaufzeit	0.7895	mit Rechteckimpulsen gemessen
$S_{11}, Z $	0.7884	im Frequenzbereich von 245 bis 440 MHz
$S_{11}, Z $	0.7880	im Frequenzbereich von 915 bis 1087 MHz

Um schließlich auszuschließen, dass die Frequenzangaben des VNWA eventuell fehlerhaft sind, habe ich diese erneut überprüft [3]. Dazu wird der Ausgang des VNWA mit dem Frequenzzähler FC 7008 verbunden und das Menu "Options/Setup/Instrument Settings" aufgerufen. Wird darin der Button "Calibrate DDS Clock Frequency" gedrückt, so sollte eine Frequenz von 10 MHz erzeugt werden. Auf dem Frequenzzähler habe ich abgelesen: 9.999952 MHz. Das entspricht einer relativen Abweichung von ca. 5×10^{-6} . Der Einfluss auf die Berechnung des Verkürzungsfaktors nach (3) und (4) ist daher vernachlässigbar.

In einem weiteren Test habe ich ein RG 58 Kabel gemessen, an dem beidseitig BNC-Stecker montiert sind. Auf dem Kabelmantel ist folgende Aufschrift zu lesen: KTH RG 58 C/U CE RoHS MIL C 17 V. Als erstes habe ich zusammen mit unserem Jüngsten Leonhard, wieder die Länge per Stahlmaßband gemessen: 20.048 m. Die Messung der Eingangsimpedanz des am Ende kurzgeschlossenen RG 58 Kabels zeigt Bild 6. Die Frequenzdifferenz zwischen den Markern 4 (1094.55248 MHz) und 5 (909.84298 MHz) wird mit der Beziehung (4) und $n = 37$ ausgewertet, Ergebnis $V = 0.6677$.

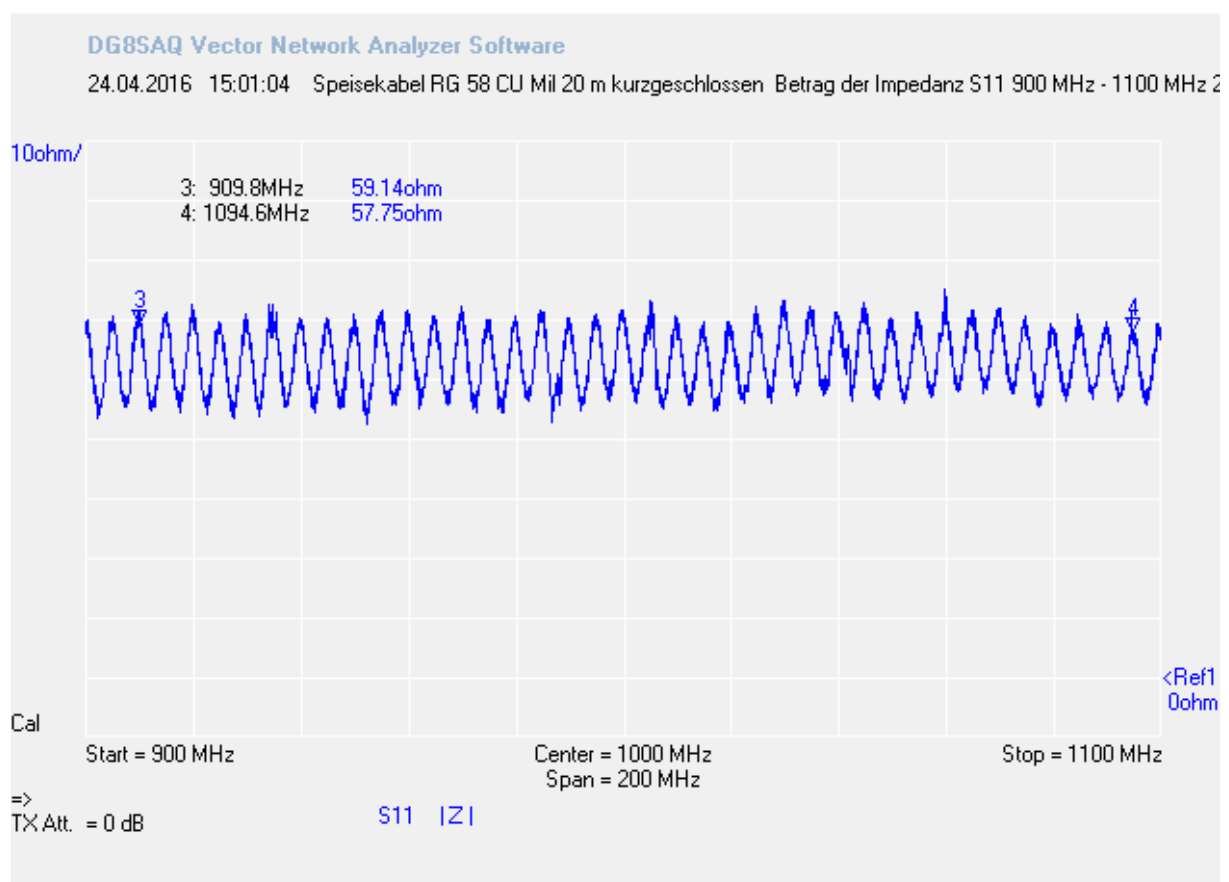


Bild 6: VNWA Messung des Betrags der Eingangsimpedanz des kurzgeschlossenen RG 58 Kabels.

Das Ergebnis der TDR Messung des am anderen Ende offenen RG 58 Kabels zeigt Bild 7.

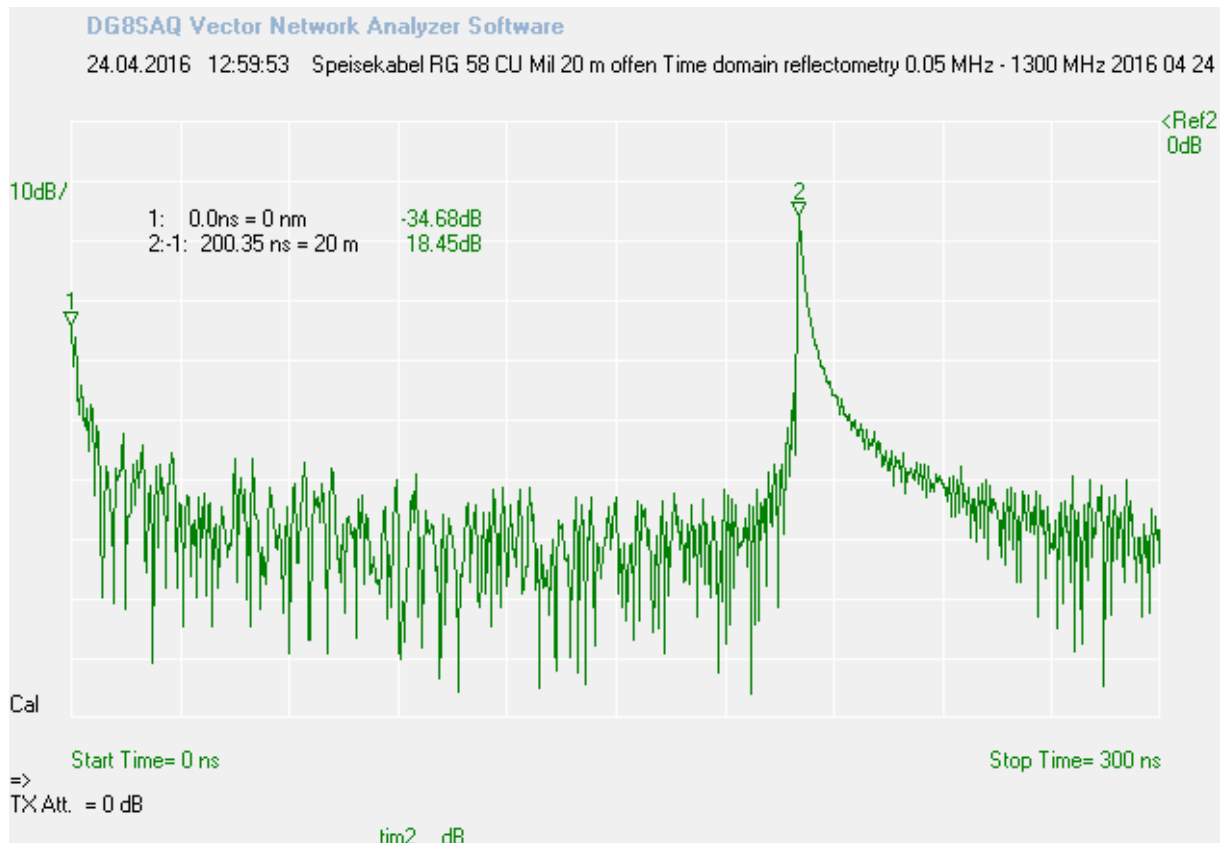


Bild 7: VNWA Messung am offenen RG 58 Kabel im Messmodus "Time Domain Reflectometry". Dargestellt ist die Messungen von tim2 (grüne Kurve). Die Zeitdifferenz zwischen Marker 2 und Marker 1 beträgt 200.35 ns

Mit der Laufzeit 200.35 ns, $V = 0.6677$ und der Beziehung (1) resultiert: $l = 20.052$ m. Die TDR Messung ist also konsistent mit den Ergebnissen der Messung der Eingangsimpedanz.

Für das Dielektrikum Polyethylen beim RG 58 Kabel kann der Verkürzungsfaktor aus der relativen Dielektrizitätskonstante bei 20 °C berechnet werden:

$$V = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (5)$$

Für Polyethylen ist $\epsilon_r = 2.25$ [4], damit folgt aus (5): $V = 0.6667$. Dieser Wert weicht nur 0.15 % vom gemessenen Wert ab. Auf Datenblättern wird für das RG 58 Kabel häufig ein Wert von $V = 0.66$ angegeben. Der gemessene Wert weicht davon um 1.15 % ab.

Fazit

Für H 2007 Kabel wurde mit mehreren Methoden der Verkürzungsfaktor gemessen: $V = 0.789 \pm 0.001$. Dieser liegt deutlich unterhalb des spezifizierten Werts von 0.83 (um 4.8 %). Vermutlich ist dies eine Folge von Toleranzen bei der Herstellung des Zell-Polyethylens, das als Dielektrikum des H 2007 dient.

Zu Kontrollzwecken wurde der Verkürzungsfaktor eines RG 58 MIL Kabels gemessen: $V = 0.667$. Dieser Wert weicht lediglich um 0.15 % von einem berechneten Wert für ein PE-Dielektrikum mit $\epsilon_r = 2.25$ ab. Gegenüber den häufig für RG 58 angegebenem Verkürzungsfaktor von 0.66 beträgt die Abweichung 1.15 %.

24.4.2016, Reinhard, DF1RN

Bezugsdokumente

- [1] <http://www.kabel-kusch.de/Koaxkabel/H2007/H200071.htm>
- [2] v2, VNWA 2.6, SDR-Kits, 13312/01-1573
- [3] VNWA als Spektrumanalysator - Messungen am Impulsgenerator, 28.10.2011, 8 S., DF1RN
- [4] P. Kurzweil, B. Frenzel, F. Gebhard, Physik Formelsammlung, Vieweg, 1. Aufl., 2008, S. 237

Anhang

Tab. A.1: Daten und Einstellungen des VNWA

	Daten
Netzwerkanalysator	v2, VNWA 2.6, SDR-Kits, 13312/01-1573
Anschlussleitungen	2 x RG 223, jeweils 19.5 cm, an TX und RX, jeweils 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 [8]
Frequenzbereich der Kalibrierung	0.05 MHz - 1300 MHz
Messpunkte	4000
Integrationszeit pro Messpunkt	1.33 ms
Time Domain Settings	S_{11} , impulse DFT, 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