

## Kabellängenbestimmung von Koaxleitungen

Man kann die Länge von koaxialen HF-Kabel mit Hilfe elektrischer Methoden bestimmen. Dazu ist auf Grund der Leitungsgleichung Kenntnis über das Dielektrikum und damit über  $\epsilon$  nötig. Die folgenden Messungen sind ein Einstieg in die TDR-Messungen (Time Domain Reflectometry). Sie gibt es seit den 1960 Jahren und werden bis heute angewendet und bei zum Beispiel Rohde&Schwarz angeboten. So werden auch Glasfaserkabel und Leitungen auf Platinen damit überprüft.

### Grundlagen:

Es gelten die folgenden Gleichungen:

$$VK = \frac{1}{\sqrt{\epsilon}} \quad (1) \text{ Verkürzungsfaktor (ohne } \mu)$$

$$v = c_0 * VK \quad (2) \text{ Ausbreitungsgeschwindigkeit}$$

$$c_0 = 2,99792458 * 10^8 \text{ [m/s]} \quad \text{Lichtgeschwindigkeit}$$

$$L = v * \frac{t_L}{2} \quad (3) \text{ Kabellänge mit } t_L = (\text{Impuls}) \text{ Laufzeit}$$

Die Laufzeit des Signals von Kabelanfang zum Ende und zurück (gemessen) ; daher 1/2  
Aus den drei Gleichungen folgt:

$$L = c_0 * VK * \frac{t_L}{2} \quad (4)$$

$$VK = \frac{v}{c_0} = \frac{2 * L}{t_L * c_0} \quad (5)$$

Für den Verkürzungsfaktor gilt:

Dielektrikum	VK	Kabelbeispiel
Teflon (PTFE)	0,69	GR-316 mit 95pF/m
Polyäthylen (PE)	0,66	GR-58 mit 101pF/m
Polystrol (PS)	0,63	-
Luft	1,00	Luftleitung

Die VK Werte können um bis zu 10% schwanken, was das Ergebnis für die Kabellänge verfälscht.

Für die Auflösungsweite zwischen zwei Störstellen, die noch darstellbar ist, gilt:

$$AW = \frac{c_0 * t_L}{\sqrt{\epsilon} * 4} \quad (6)$$

Bei  $t_L = 5\text{ns}$  ergibt dies  $AW = 0,247\text{m}$ ; Entscheidend bei der Auflösung sind kleine Systemanstiegszeiten und Pulse.

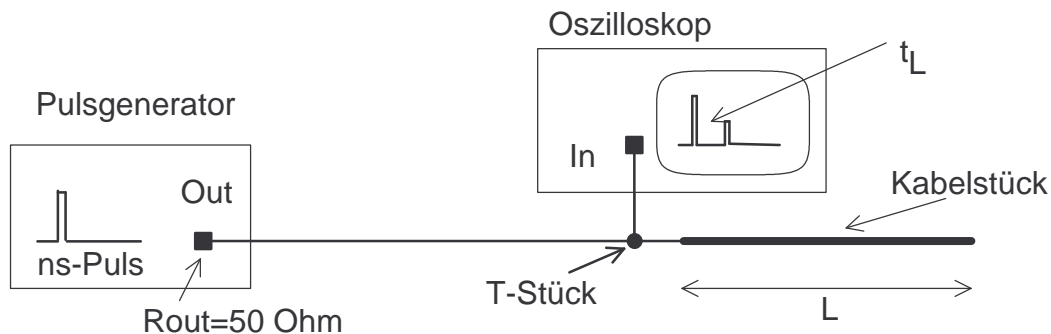
Für den Spektrumanalysator wird die Frequenz in die Zeit umgerechnet:

$$\frac{1}{x[\text{Hz}]} = t[\text{s}] \quad (7)$$

## Messaufbauten:

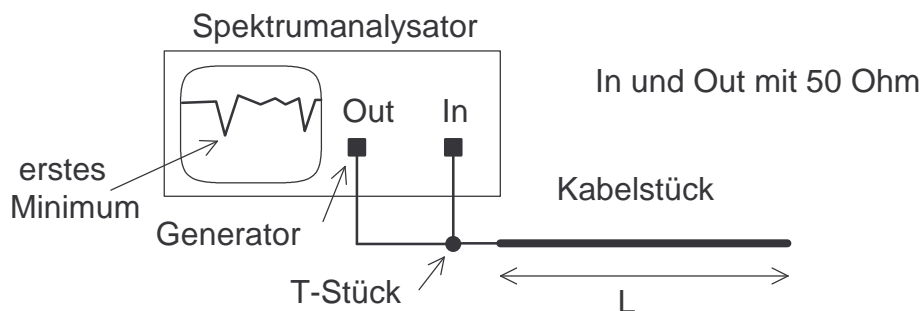
Es gibt drei Geräteaufbauten, mit denen man die Messungen durchführen kann. Die Methode mit einem Netzwerkanalysator über Delay/Phase wird hier nicht betrachtet, da dieses Gerät nur die Wenigsten zur Verfügung haben. In allen Fällen ist das Kabelstück hier am Ende offen.

Die klassische Methode ist mit einem Pulsgenerator und einem Oszilloskop. Um eine hohe Auflösung, also kleine Strecken messen zu können, muß das Oszilloskop eine Bandbreite über 100MHz haben und der Pulsgenerator Pulse im ns Bereich erzeugen.



Der zweite Puls ist durch die Verluste (Dämpfung) des Kabelstücks kleiner, als der erste erzeugte Puls. Alles wird im 50 Ohm System bestimmt. Wenn die Pulsdauer größer als die Verzögerungsstrecke ist, mißt man mit einem Einheitssprung. Hier addiert sich die rücklaufende Welle bei Open auf die hinlaufende Welle als Treppe mit  $t_L$  verzögert. Theoretisch kann man über die Höhe und die Form der rücklaufenden Welle genauere Angaben zum Abschlußwiderstand machen, was hier aber nicht beachtet wird. Um maximale Reflexion zu erhalten bleibt das Kabelstück am Ende offen!

Bei der zweiten Methode benötigt man einen Spektrumanalysator mit Mitlaufgenerator. Auch hier gilt, je höher die Frequenz, desto besser die Auflösung. Bei etwa 1GHz sind noch 5cm meßbar.

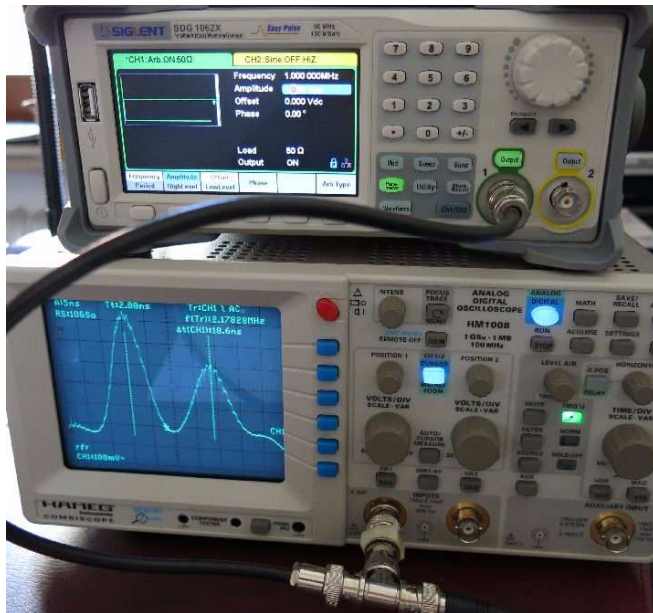


Die Kurve am Spektrumanalysator hat mehrere Minima. Die Frequenzmessung muß aber beim ersten Minimum erfolgen. Dazu vergrößert man mit Center-Frequency den Messbereich.

## Messbeispiele:

Getestet wird ein Kabel RG-58 (PE) mit 2BNC-Steckern bei etwa 2 Meter mechanischer Länge. VK wird mit 0,66 angenommen. Diese Messung wurde schon vor Jahren gemacht.

### Testaufbau: Oszilloskop

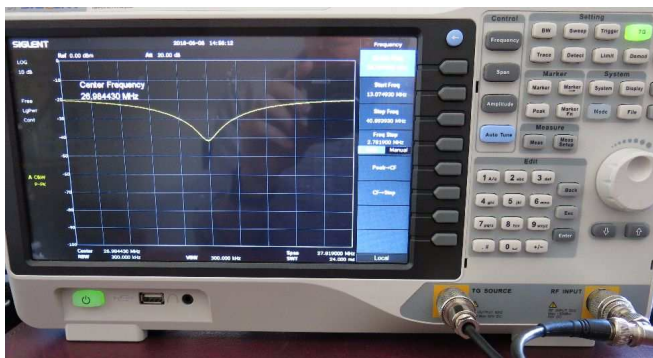


Das Testsignals ist ein Peak-Puls mit kleiner Anstiegszeit und 1Vpp Pegel. Die An- und Abfallzeit des Pulses ist etwa 4ns. Die Wiederholfrequenz ist nur für die Darstellung relevant. Mit einer Kursormmessung wird der Abstand zwischen dem Eingangspuls und dem Reflexionspuls zu  $t_r=18,5ns$  ermittelt. Je kürzer das Kabelstück ist, desto näher liegt der Reflexionspuls beim Eingangspuls. Eine Verschmelzung der Signale bestimmt die kleinste noch meßbare Kabellänge. Mit Gleichung (4) folgt:

$$L = c_0 \frac{m}{s} * 0,66 * \frac{18,5 * 10^{-9}s}{2} = 1,830 m$$

Die Länge ist: 1,830m

### Testaufbau: Spektrumanalyzer



Der Mitlaufgenerator speist den Aufbau mit -20dBm um die Eingangsstufe des Analysators nicht zu überlasten. Der Bereich wird zuerst von 100 kHz bis 1 GHz gewählt. Allgemein gilt je kürzer die Leitung, desto höher die Frequenz. Nach Feststellung des ersten Minimums ist der Analyzer so einzustellen, das diese in der Mitte der Anzeige bei guter Auflösung zu sehen und deren Frequenz zu bestimmen ist. Das Minimum wird

zu 26,984430 MHz bestimmt. Mit Gleichung (7) folgt:

$$\frac{1}{26,984430 * 10^6 Hz} = 3,705840739 * 10^{-8} s = 37ns$$

Dieser Wert muß noch durch zwei geteilt werden und wird dann in Gleichung (4) eingesetzt.

$$L = c_0 \frac{m}{s} * 0,66 * \frac{37,058 * 10^{-9}s}{4} = 1,833 m$$

Die Länge ist: 1,833m

**Ergebnis:** Die Differenz der beiden Methoden liegt bei 0,003 m ; jedoch die Abweichung von der mechanischen Länge bei 0,2 m. Das könnte bei dem gemessenen Kabel an einem falschen VK liegen.

Hier werden weitere neue Messungen vorgestellt. Als Quellen diente bei der Oszilloskopmessung ein Bausatz eines Spike-Generators (ELV 6/1996) mit einem etwa 25ns breiten Puls bei 455kHz oder ein Pulssignal von 1% bei 10kHz (Treppe) und 1MHz (Pulse) mit einem SDG1062X-Generator. Als Oszilloskop standen ein 100MHz Hameg HM1008 und ein 200MHz SHS800X zur Verfügung. Der Spektrumanalyzer vom Typ SSA3021X geht bis 2,1GHz. Die Messungen sind nicht so präzise wie zunächst angenommen aber liegen wohl innerhalb von 20% Messunsicherheit. Es wurden BNC-Kabel von 2m, 1m , 20cm und ein Adapterpaar gemessen. Da für kurze Strecken die Messungen nur mit GHz-Oszilloskopen und Pulsen im ps Bereich möglich sind, konnte hier nur der Spektrumanalyzer verwendet werden.

### Bilder der Messungen:



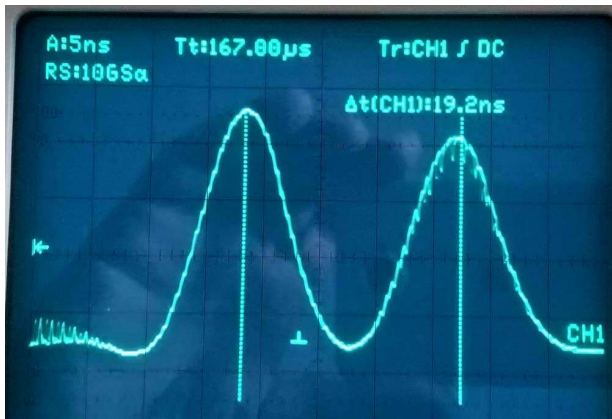
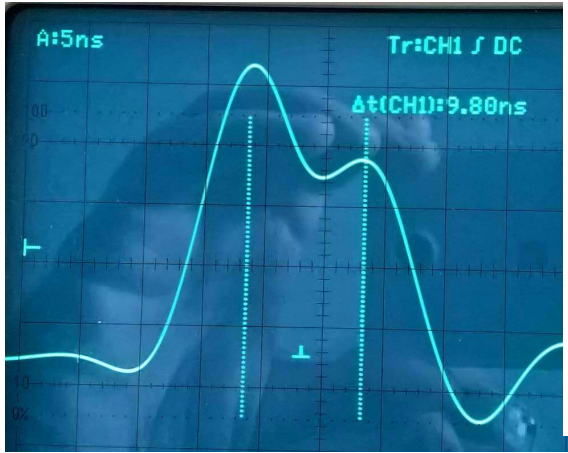
Pulstreppe (ELV) 1m und 2m; hier ist das Signal nicht so gut.



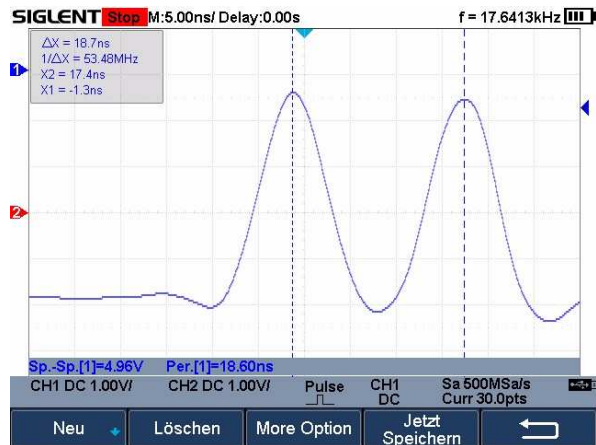
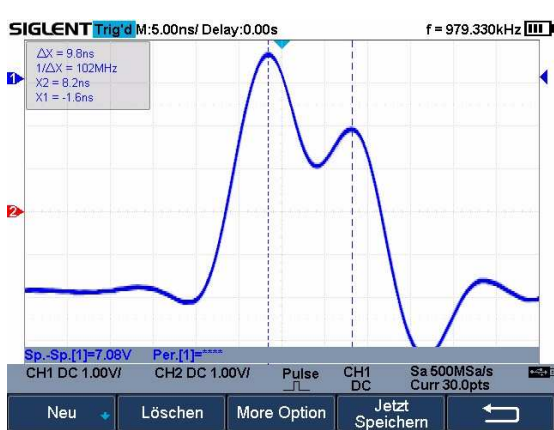
Pulstreppe (SDG) 1m und 2m

Es wurden je die Delta-Marker ausgewertet, siehe dx im rechten Kasten.

Auf der nächsten Seite wurde mit den kurzen Pulsen bei 1MHz mit dem SDG, wie auch auf Seite 3, gemessen. Dabei kam auch das Hameg wieder zum Einsatz. Da dieses Oszilloskop sowohl analog, wie auch digital arbeiten kann, wurden beide Modi getestet. Es gab aber keinen Unterschied bei den Signalen.

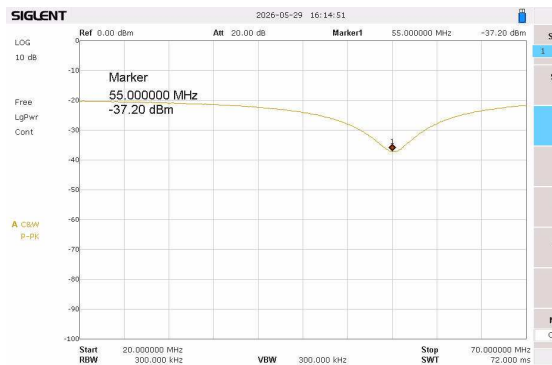


Pulsmessung mit Hameg bei 1m (analog) und 2m (digital) mit dt Anzeige



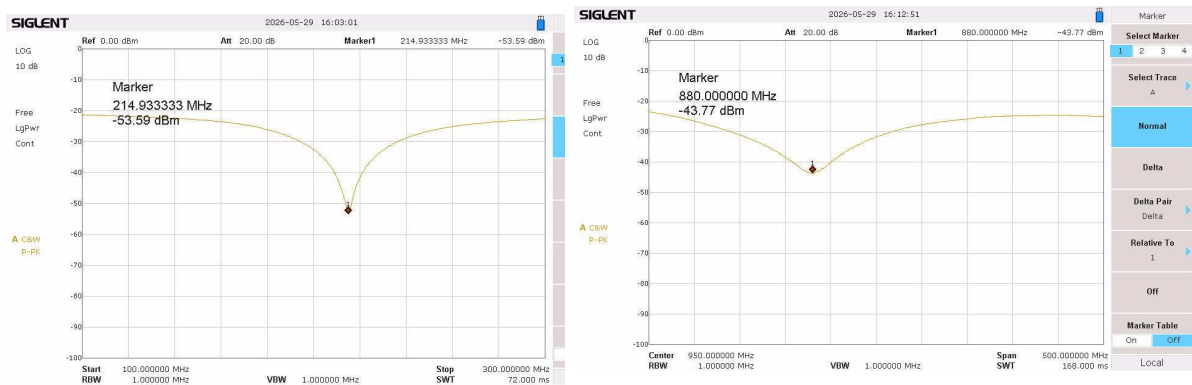
Pulsmessung bei 1m und 2m

Bei dem Spektrumanalyzer werden die Laufzeiten als Pegelbrüche bei bestimmten Frequenzen im Frequenzbereich dargestellt.

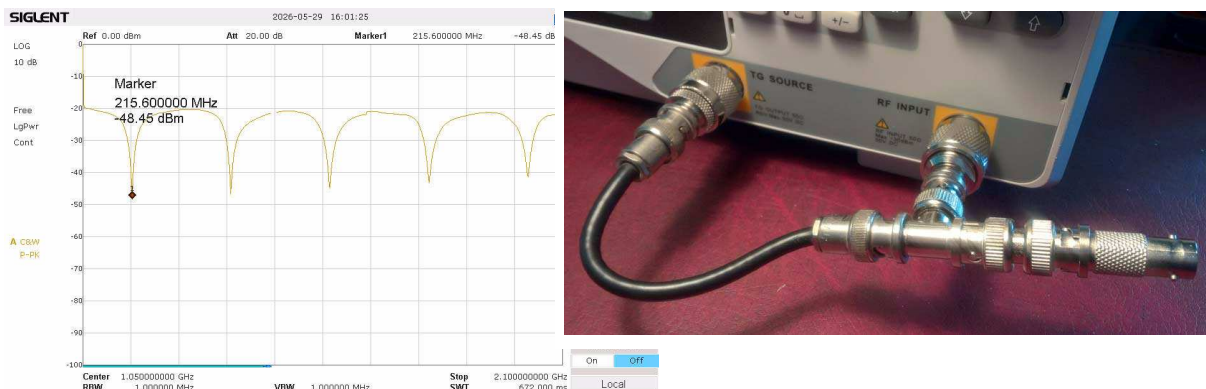


Messung bei 1m 55MHz und 2m 26,78MHz

Beim Spektrumanalyzer konnten auch kürzere Leitungstücke gemessen werden.



Messungen bei 20cm 214,9MHz und einem BNC Adapterpaar M-M-f 880MHz.



Wie anfangs beschrieben muß beim Spektrumanalyzer das erste Minimum, hier bei 20cm, genommen werden. Im rechten Bild sieht man das Adapterpaar mit dem T-Stück angeschlossen.

**Tabelle:**

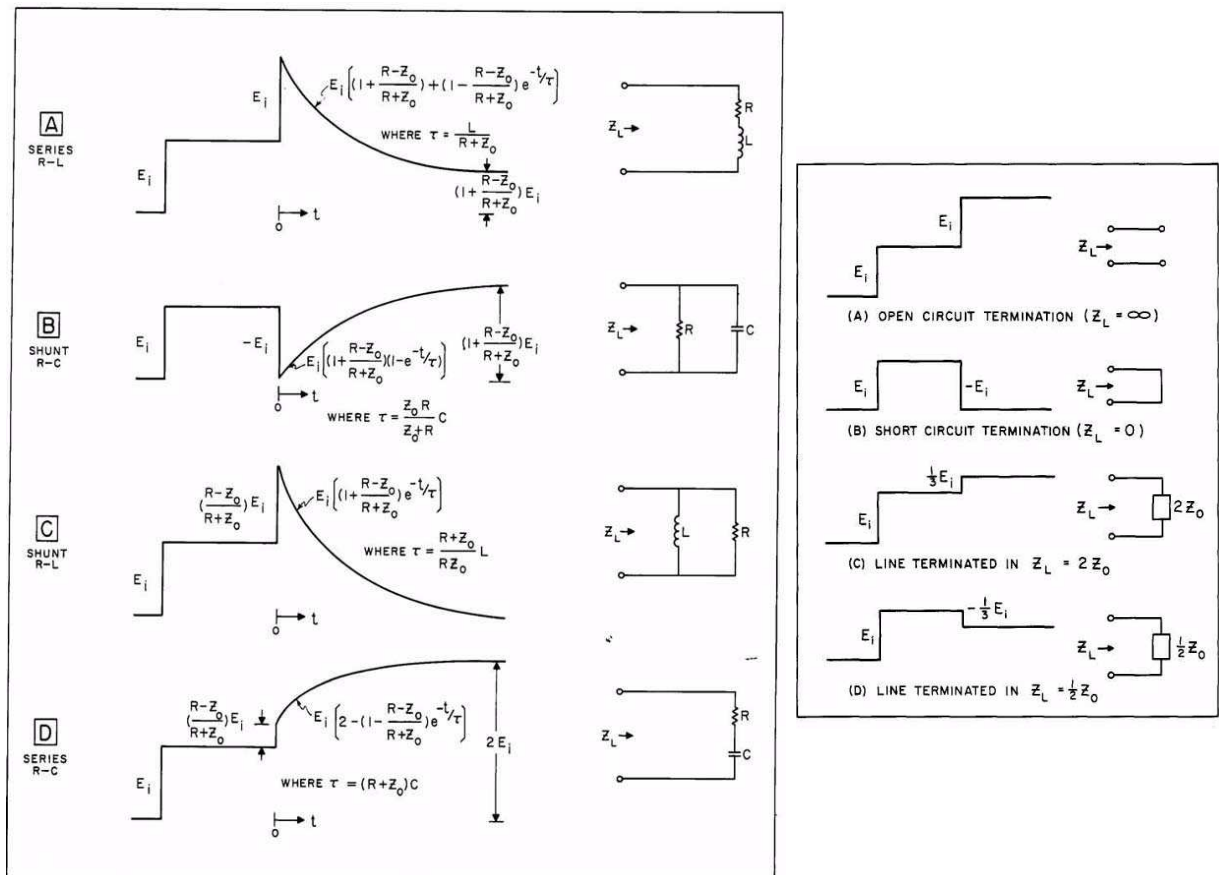
Länge	SHS teils mit ELV	Hameg	SSA Teiler 4 !
2m: Zeit/Frequenz Meter	18,7ns; 18,9ns; 19,2ns 1,85m; 1,869m; 1,889m	19,2 ns 1,899 m	37,38ns/26,80 MHz 1,849 m
1m: Zeit/Frequenz Meter	9,7ns; 9,8ns; 10ns 0,959m; 0,97m; 0,989m	9,8 ns 0,969 m	18ns/55 MHz 0,899 m
20cm: Frequenz cm	nicht möglich		4,65ns/214,9 MHz 23 cm
Adapter: Frequenz cm (ca. 5,5cm)	nicht möglich		1,14ns/880 MHz 5,6 cm

Normal entspricht: 1m  $\approx$  10ns / 20ns      Messunsicherheit  $\pm$  20%

Wie man leicht erkennt schwanken die Ergebnisse je nach Aufbau. Zudem kommt noch das unbekannte VK hinzu. Die Mittelwerte sind: 1,871m und 0,957m. Man sieht schon an den Kurven, an denen man die Marker setzen muß, das die Stellen nicht immer so eindeutig sind. Je kleiner die Anstiegszeiten der Pulse und je höher die Frequenz der Oszilloskope ist, desto besser könnte man die Werte ermitteln; was hier nicht der Fall ist.

## Sprungtheorie:

Hier nun Beispiele, wie der Einheitsprung bei bestimmten Lasten am Ende der Leitung aussieht. Links mit komplexen und rechts mit ohmschen Lasten auch Open/Short.



## Literaturliste:

Hier eine Auswahl von Unterlagen zu dem Thema

- /1/ Messungen der Eigenschaften koaxialer Kabel Stadler/Dubyk  
Funk-Technik 40 (1985) Heft 2+3  
nicht nur Längenbestimmung wird behandelt
- /2/ Aufspüren von Koaxial-Kabel-Bruchstellen Henschel  
Funkschau 24 / 1992  
Mit Schaltplan von Nanosekunden-Impulsgenerator
- /3/ TDR Aufsatz für Oszilloskope Kaindl  
Elektor 617 / 2026  
Bausatz Rechteck mit 3ns und Oszibildern
- /4/ TDR der Blick ins Kabel Jens / DF5HC  
Vortrag PDF aus dem Netz  
Sehr anschaulich mit zwei Schaltungen Puls und Rechteck

- /5/ Hewlett Packard TDR  
Application Note AN 62 PDF aus dem Netz  
Theorie von 1964 (siehe hier Seite 7)
  
- /6/ Hewlett Packard 1415A TDR           MU.  $\pm$  5%  
Geräte Manual vom Messgerät auch für Längenmessungen  
Beschreibung von 1968 mit schon 150ps Anstiegszeiten
  
- /7/ Genauigkeit einer Längenmessung ....           Müller  
HF-Praxis 11/2011 Zeitschrift PDF aus dem Netz  
Messung mit Spektrumanalyzer und VSWR Brücke
  
- /8/ Laufzeit- und Längenmessung mit VNA           Müller  
HF-Praxis 4/2012 Zeitschrift PDF aus dem Netz  
Messung mit Netzwerkanalysator

IH©2026