

Präzise Laufzeit- und Längenmessungen mit dem vektoriellen Netzwerkanalyzer

Moderne vektorielle Netzwerkanalyzer (VNA) sind heute in der Regel mit der Funktionalität zur Längenmessung durch das DTF-Verfahren ausgerüstet.

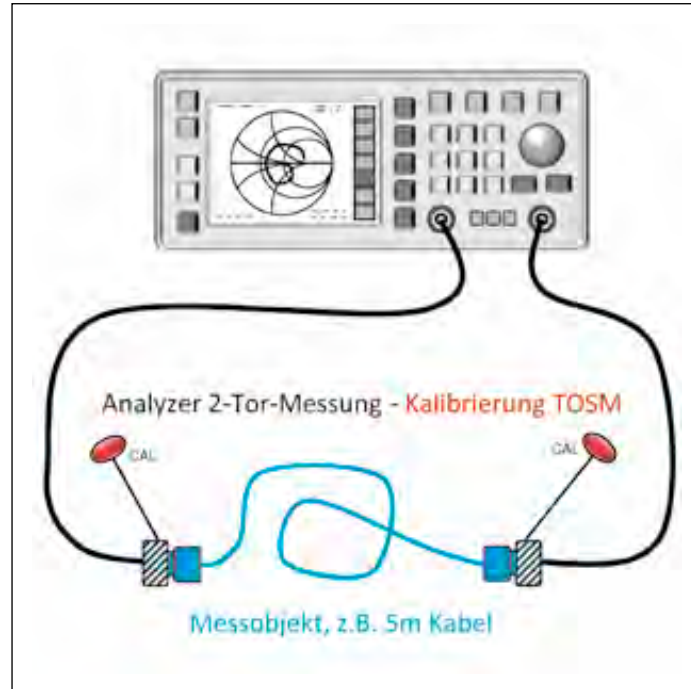


Bild 1: Messaufbau Transferrmessung, 2-Tor-Messung, S21

Sehr genaue Messungen lassen sich jedoch durch Ausnutzung der ureigensten Funktion des vektoriellen Netzwerkanalyzers, nämlich der Messung der Phase, erreichen. Die Hintergründe und der Messaufbau der Längenmessung, anhand der Auswertung des Phasenverlaufs über der Frequenz, werden in diesem Artikel aufgezeigt.

Aufgrund von Laufzeiteffekten erfährt ein am Kabelanfang eingespeistes Signal zum Kabelende hin eine Verzögerung. Betrachtet man gleichzeitig (Oszilloskop) die Phasenlage des Signals zwischen Anfang und Ende der Strecke, wird man eine Phasenverschiebung erkennen. Voraussetzung ist, dass das Messobjekt nicht dispersives Verhalten aufweist, die Laufzeit über der Frequenz muss konstant bleiben, was bei Leitungen, Adaptern und Steckern gegeben ist. Die Laufzeit für ein Stück Kabel ist abhängig von seiner mechanischen Länge und dem Material des Dielektrikums (ϵ).

$$\tau = \frac{l_{\text{mech}} \cdot \sqrt{\epsilon}}{c}$$

$$c = 300\,000 \text{ km/s}$$

Das in den nachfolgenden Beispielen verwendete Kabel weist eine mechanische Länge von 5 m auf, ϵ liegt bei einem Wert von 2,3 für Isoliermaterial PVC. Die Laufzeit errechnet sich unter Anwendung der Formel auf 25,3 ns. Aus der mechanischen Länge kann mit dem Verkürzungsfaktor die elektrische Länge berechnet werden, sie liegt im vorliegenden Beispiel bei 7,6 m. Damit sind die Parameter des Messobjekts anhand von Datenblattwerten grob bestimmt.

Ein eingespeistes Sinussignal wird am Kabelende mit 25 ns Verzögerung eintreffen, was einer entsprechenden Phasenverschiebung zwischen Anfang und Ende gleichsteht. Dieser Effekt kann mit einem Oszilloskop nachvollzogen werden, wenn die Signale an der Quelle und am (reflexionsfreien) Ende über zwei getrennte Kanäle

simultan dargestellt werden. In einem besonderen Fall ist jedoch keine Phasenverschiebung mehr erkennbar: Und zwar dann, wenn die Laufzeit mit der Periodendauer des Signals deckungsgleich wird. Die Betonung liegt auf deckungsgleich! Erhöht man die Frequenz, treten fortlaufend weitere Konstellationen auf, die dazu führen, dass die Phasenverschiebung nicht ohne weiteres sichtbar ist, und zwar bei allen ganzzahligen Vielfachen der Frequenz.

Für unser Beispielmessobjekt mit 5 m Länge und 25 ns Laufzeit heißt das: Bei einer Frequenz f , deren Periodendauer T bei 25 ns liegt, also konkret bei 40 MHz und deren Vielfachen.

$$f = 1/T = 1/25 \text{ ns} = 40 \text{ MHz}$$

Betrachtet man die Vorgänge etwas näher, dann wird die gewählte Formulierung „Phasenverschiebung erkennbar“ deutlicher. Das Signal erfährt durch die Laufzeitverschiebung grundsätzlich immer eine Phasenverschiebung, nur im „besonderen Fall“ beträgt diese exakt 360° . Und genau das ist nicht ohne weiteres erkennbar.

Daher birgt das Messverfahren der Phasenlaufzeit gewisse Fußangeln, die es zu umgehen gilt.

Betrachten wir hierzu zunächst die Grundformel für die Berechnung des augenblicklichen Phasenwinkels eines Signals an einer bestimmten Stelle (nach bestimmter Laufzeit τ) auf dem Kabel:

$$\varphi = -360^\circ \cdot f \cdot \tau$$

τ = Laufzeit bis zum Messort

Sie gibt als Ergebnis den Phasenverschiebungswinkel aus, der am Messort bzw. Kabelende erkennbar sein wird. Nun könnte man die Formel leicht so umstellen, dass als Ergebnis die Laufzeit τ ausgegeben wird. Das ermöglicht, durch Messung des Phasenwinkels φ bei einer Frequenz f , den direkten Rückschluss auf

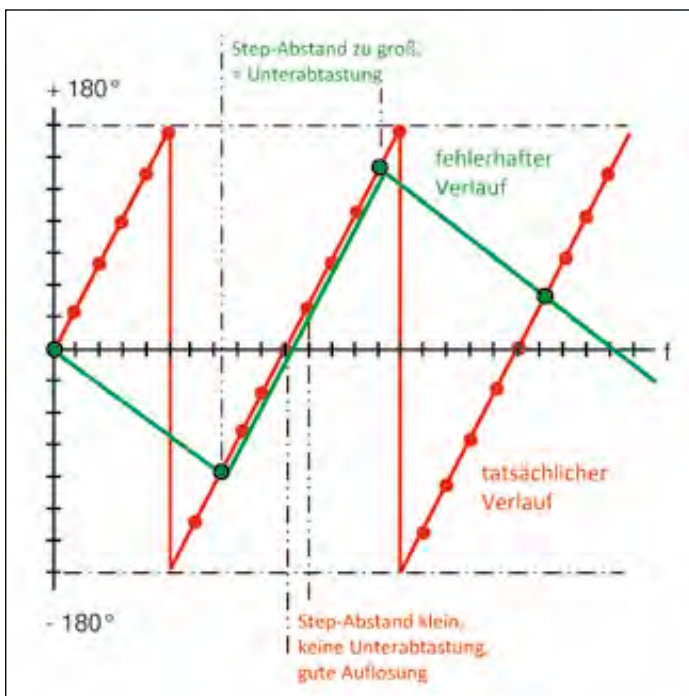


Bild 2 Auswirkung bei zu großem Step-Abstand

die Laufzeit, und die wiederum auf die Länge des Kabels. An dieser Stelle lauert nun aber die Fußangel! Wir können nicht beurteilen, ob bei dem gemessenen Wert des Phasenwinkels

die 360°-Winkelgrade schon mal erreicht worden sind, oder eventuell sogar mehrere Durchläufe der 360°-Marke, sprich Phasensprünge, stattgefunden haben. In diesem Fall würde

der, in die nach τ umgestellte Formel, eingesetzte Messwert ϕ zu einem völlig falschen Ergebnis der Laufzeit führen.

Der vektorielle Netzwerkanalyzer kann sehr genaue Phasenmessungen durchführen, hierfür ist er absolut prädestiniert. Der Messaufbau ist in Bild 1 dargestellt, es handelt sich um eine gewöhnliche 2-Tormessung, ermittelt wird der S-Parameter S21.

Vorbereitungen zur Messung

Bevor die notwendige komplette TOSM-Kalibrierung durchgeführt wird, sollte man kurz weiteren Überlegungen etwas Raum geben, man erspart sich dadurch eventuell die Zeit für einen wiederholten Kalibrierdurchgang.

Wie bereits dargestellt, führt die Nichtkenntnis von bereits erfolgten Phasensprüngen zu stark fehlerhaften Laufzeitwerten. Der Analyzer wird uns alle über die Laufzeit vollzogenen Phasensprünge visualisieren. Das kann er jedoch nur dann korrekt aus-

führen, wenn der Step-Abstand des durchfahrenen Frequenzbereichs auch die entsprechende Auflösung zulässt.

Wir wollen auch diesen Sachverhalt etwas detaillierter betrachten: Für eine korrekte Messung ist die gewählte Anzahl der Steps über der Frequenzspanne (Start / Stop) bzw. der Frequenzabstand zwischen den Steps relevant. Innerhalb des Step-Abstandes darf der Phasenverlauf nicht mehr als 180° betragen, denn sonst werden einer oder mehrere Phasensprünge ausgelassen, was unweigerlich zu einer Fehlmessung führt.

Den tatsächlichen Phasenverlauf zeigt die rote Kurve in Bild 2. Die grüne Kurve wurde aus den Werten bei zu großem Step-Abstand konstruiert. In der Messtechnik ist diese Problematik durchaus nicht neu, sie wird allgemein als Unterabtastung bezeichnet. Während man von Messgeräten aus anderen Bereichen eventuell die Ausgabe von Warnhinweisen zur Unterabtastung gewohnt ist, sind wir hier auf uns gestellt. Der Analyzer kann nicht selbständig erkennen, wie lange nun das an den Ports angeschlossene Kabel bzw. die Laufzeit des Messobjekts sein wird, um dann zu melden, dass man gerade den Step-Abstand ungünstig wählt. Der Messtechniker muss im Vorfeld die notwendige Einstellung selbst entscheiden; das ist gut so, denn schließlich soll er durch zu hohe Intelligenz der Geräte, die manchmal schon wie Selbstherrlichkeit anmutet, nicht entmündigt, allenfalls entlastet werden.

Es ist also notwendig, die Laufzeit des Messobjekts überschlägig abzuschätzen: Unser Musterkabel hat eine mechanische Länge von 5 m, was beim Ansatz der Laufzeit von 5 ns/m zu einem Schätzwert von 25 ns führt. Wie anfangs bereits berechnet, entspricht eine Periodendauer von $T = 25 \text{ ns}$ einer Frequenz von 40 MHz. Für eine ordentliche Auflösung der Periodendauer und ihres 360°-Phasenverlaufs wäre 1/10 der Frequenz als Step-Abstand, hier im Beispiel also 4

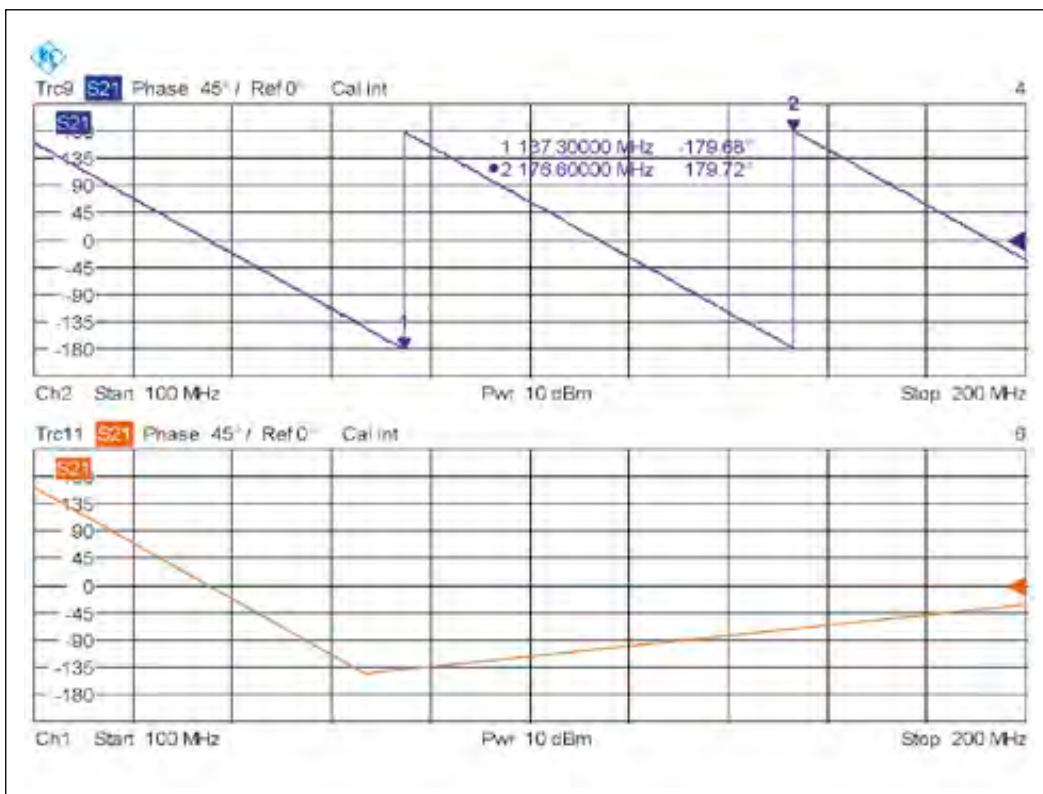


Bild 3: Messung an 5 m Koaxkabel mit ausreichendem Step-Abstand (blau) und mit Unterabtastung (orange)

MHz, praxisgerecht. Eine Unterabtastung wird mit dieser Einstellung ausgeschlossen.

Die Wahl des Sweepbereichs bestimmt die Anzahl der dargestellten Phasensprünge im Kurvenzug. Hier ist es sinnvoll, mindestens 2 – 3 vollständige Phasenverläufe zu visualisieren. Für das Beispiel wurde der Sweepbereich vom 100 bis 200 MHz eingestellt.

Für Längenmessungen an einem Stück Kabel im Bereich von wenigen Metern sind die erforderlichen Einstellwerte leicht zu erfüllen. Der standardmäßig eingestellte Step-Abstand wird den für eine korrekte Messung notwendigen Wert bei Weitem abdecken. Die Bestimmung der elektrischen Länge, z.B. von Steckadaptern, also im Längenbereich von einigen zehn Millimetern, könnte u.U. den dafür notwendigen Sweepbereich des Analyzers sprengen.

Nach Abschluss dieser Überlegungen können nun die Einstellungen vorgenommen werden. Mit nachträglichen Veränderungen, die eventuell zum Verlust

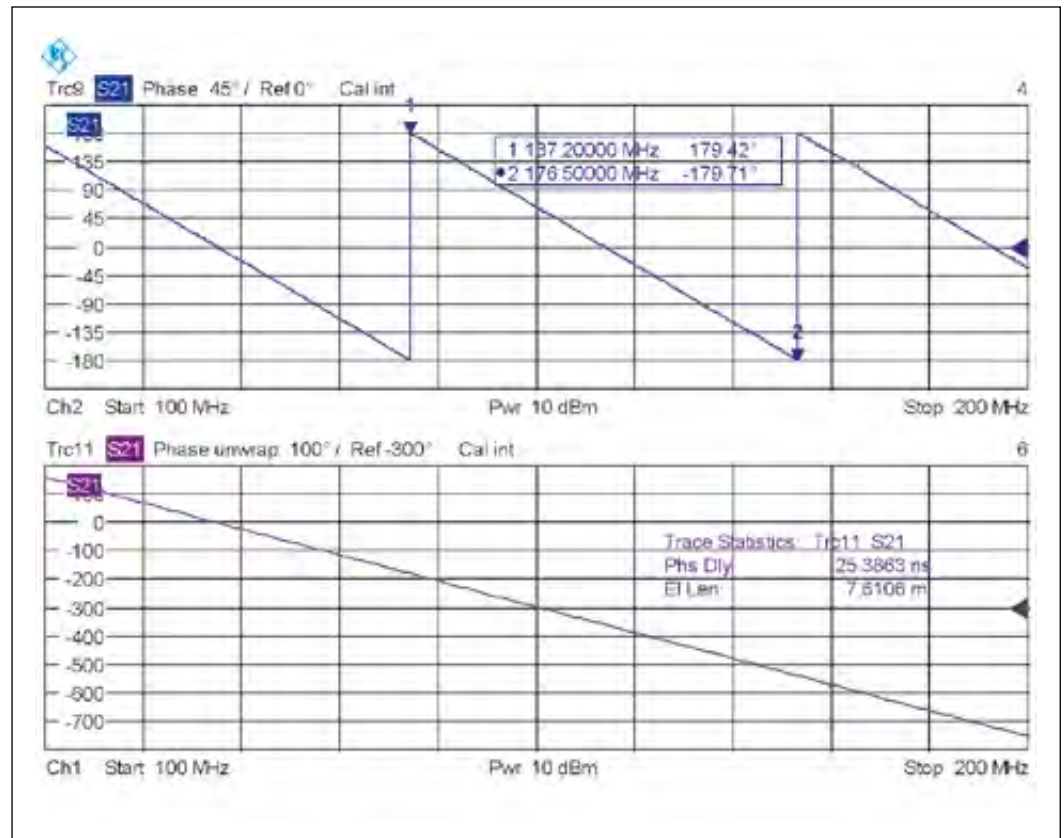


Bild 4: Darstellung der Phasensprünge (blau) und als unwrapped Phase (violett)

der jetzt anschließend durchzuführen, ist man nicht mehr konfrontiert. Bild 3 zeigt die Phase der S21-Messung des 5 m langen Kabels, im oberen Teil mit

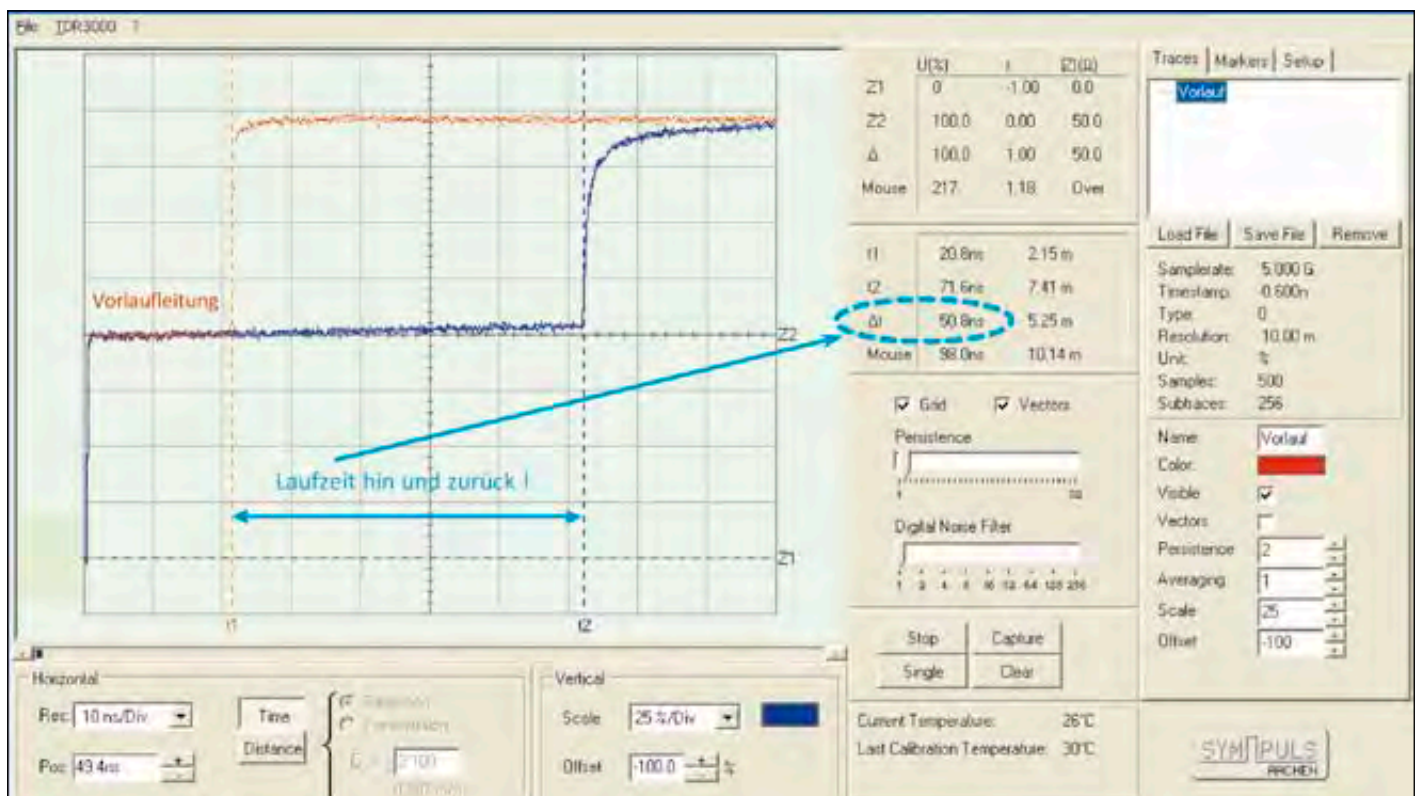


Bild 5: Kontrollmessung in einem anderen Verfahren (TDR)

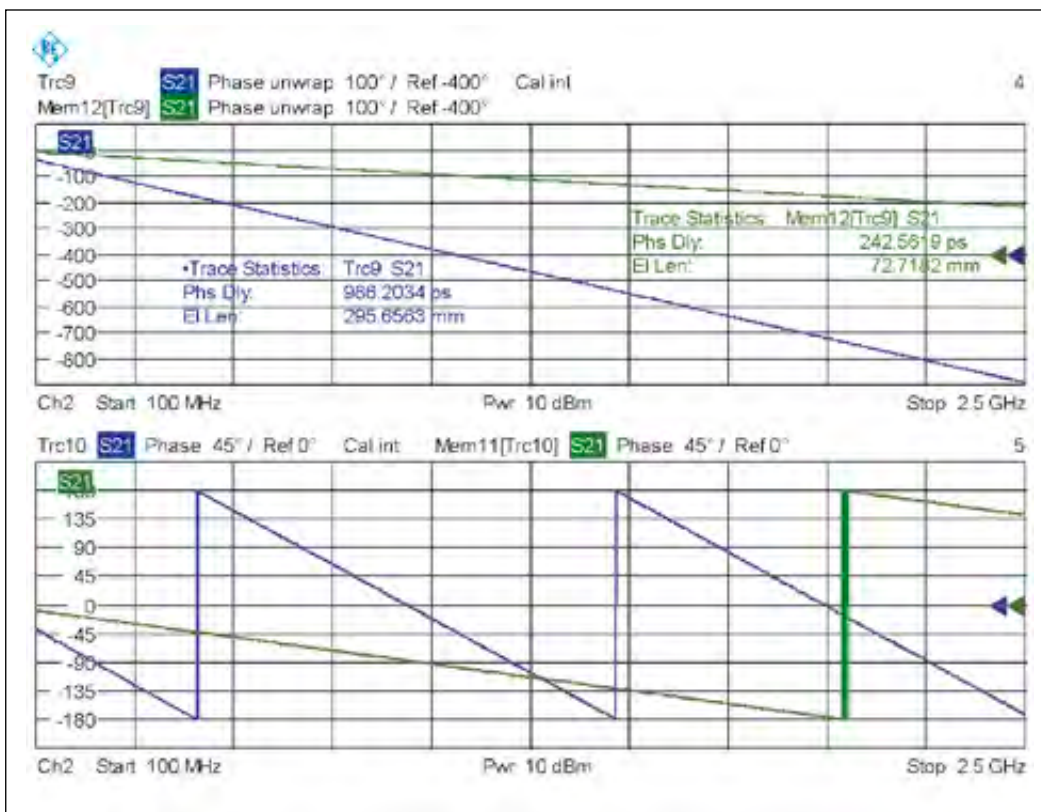


Bild 6: Messung an koaxialen Bauteilen, Kalibriernormal (Trough) und Präzisionsdämpfungsglied

korrekt gewähltem Step-Abstand (blaue Kurve). Im unteren Teil des Bildes wurde eine Unterabtastung provoziert (Kurve orange), was verdeutlicht, dass der angezeigte Phasenverlauf nicht zum tatsächlichen Wert der Laufzeit führen würde.

Die Berechnung der Laufzeit erfolgt durch folgende Grundformel:

$$\tau = \frac{1}{360^\circ} * \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{f_1 - f_2}$$

In Worten ausgedrückt, handelt es sich beim zweiten Bruch um die Differenz der Phasenwinkel über der Frequenzdifferenz. Die Marker auf der blauen Kurve wurden zur leichteren Handhabung auf die Phasensprünge gesetzt, das ergibt eine Winkeldifferenz von 360° . Dieser Wert kürzt sich mit dem ersten Bruch der Formel, womit die Frequenzdifferenz übrig bleibt. Somit muss nur noch der Kehrwert der Frequenzdifferenz gebildet werden, was zum angestrebten Ergebnis der Laufzeit führt, im Beispiel sind das bei $f = 39,3 \text{ MHz}$ $\tau = 25,44 \text{ ns}$.

Das passt zu unserer im Vorfeld aufgestellten Überschlagsrechnung. Betrachtet man die Winkeldifferenz der durch Unterabtastung verfälschten Kurve, so wird deutlich, wie weit entfernt man vom korrekten Ergebnis liegen wird.

Moderne Analyser bieten eine zusätzliche Funktionalität in der Kurvendarstellung, die als „unwrapped Phase“ bezeichnet wird. Hier wird der Phasenwinkel „fortlaufend“ über den gesamten Sweepfrequenzbereich geschrieben, d.h. die Skalierung für den Winkel überschreitet den Wert von 360° und wird dabei weitergeführt. Ein Beispiel für diese Darstellung ist in Bild 4 im unteren Diagramm zu sehen (violette Kurve). Die Skalierung endet dort bei 800 Winkelgraden. Je nach Länge bzw. Laufzeit des Messobjektes kann hier eine Skalierung von mehreren 1000 Winkelgraden entstehen.

Der Vorteil an dieser Darstellung: Die Differenz zwischen Start- und Stopfrequenz und der über die Phasensprünge hinweg fortgeführte, quasi aufsummierte

Wert der Phasenwinkel kann direkt zur Laufzeitberechnung herangezogen werden. Und noch mehr wird angeboten: Die Statistikfunktion übernimmt, tatsächlich zur Entlastung des Messtechnikers, gleich über den gesamten Trace die Berechnung und Ausgabe der Laufzeit und elektrischer Länge.

Betrachtungen zur Genauigkeit:

Der anhand der Phasenmessung ermittelte Wert der Laufzeit von 25,44 ns erscheint plausibel, doch wie genau ist er? Für die Kontrolle wird ein anderes Messverfahren verwendet. Dazu wird das Beispielmessobjekt an ein TDR angeschlossen. Das Ergebnis zeigt Bild 5. Auch hier gilt wieder die blaue Kurve, Marker t1 wird auf das zu Beginn ermittelte Ende der Vorlaufleitung gesetzt, Marker t2 steht auf dem Leitungsende unseres Messobjekts. Als Differenz zwischen den beiden Markern werden 50,8 ns ausgegeben, siehe blaue Markierung. Das TDR zeigt systembedingt hier

die Laufzeit für den Hin- und Rückweg an, also die doppelte Laufzeit. Wird der Wert halbiert, erhalten wir ebenfalls 25,4 ns. Beide unterschiedlichen Messverfahren führen zum gleichen Ergebnis, womit sichergestellt ist, dass kein systematischer Fehler vorliegt.

Die Laufzeit- bzw. Längenmessung mit einem vektoriellem Netzwerkanalyser bietet einige Vorteile. Der Messaufbau wurde einer Kalibrierung (TOSM) unterzogen, damit sind die Bezugsebenen der verwendeten Verbindungsstellen (Stecker, Buchsen, Adapter) zweifelsfrei definiert. Wird das Messobjekt eingefügt, erfolgt die Laufzeit- bzw. elektrische Längenmessung exakt auf diese definierten Bezugsebenen. Beim TDR bleibt das Leitungsende meist offen, womit die Bezugsebene nicht fixiert ist. Sollen Laufzeiten für Adapter oder von anderen kurzen koaxialen Komponenten ermittelt werden, birgt die TDR-Messung Ungenauigkeiten. Wird das Bauteil zwischen die „kalibrierten Leitungsenden“ der Analyzer-Ports eingefügt, braucht man sich um die korrekte Lage der Bezugsebenen und deren Berücksichtigung nicht mehr zu kümmern.

Wie bereits angedeutet, verfügt der vektorielle Netzwerkanalysator über eine sehr hohe Genauigkeit bei der Phasenmessung. Je nach Gerät liegt diese bei wenigen Winkelgraden bzw. bei Bruchteilen eines Winkelgrades. Bezieht man diese Winkelangaben auf entsprechende Frequenzabstände, so sind ohne weiteres Genauigkeiten bei den gemessenen Laufzeiten von wenigen Picosekunden und damit bei der elektrischen Länge im Millimeterbereich bis in den Mikrometerbereich zu erzielen.

Bild 6 zeigt die Messung an zwei koaxialen Bauteilen. Hinter der grünen Kurve verbirgt sich ein Kalibriernormal (Trough), der Vergleich mit den Daten aus dem Kalibrierzertifikat entspricht exakt dem angezeigten Wert. Die gemessene Laufzeit beträgt 242 ps! Im TDR-Verfahren wäre

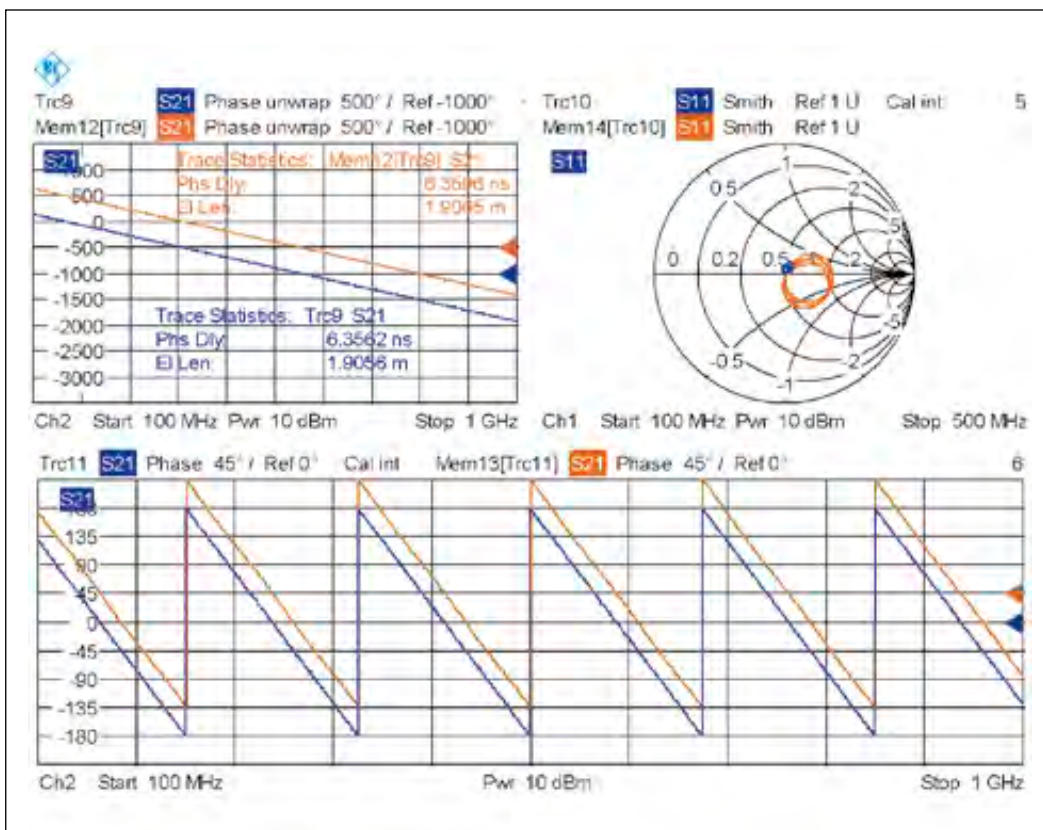


Bild 7: RG58 und RG 59 gleicher mechanischer Länge

diese Auflösung nur mit einem sehr hochwertigen Gerät erreichbar. Die blaue Kurve gehört zu einem Präzisions-Dämpfungsglied. Weder seine Dämpfung noch die optimierte Anpassung des Messobjekts nimmt nachteiligen Einfluss auf die Phasenmessung.

Mechanische Länge

Bisher haben wir nur die Laufzeit und elektrische Länge betrachtet, welche in der Regel auch eher praxisrelevant sein dürfte. Ein typisches Anwendungsbeispiel ist die Ermittlung einer Offsetslänge zur Korrektur bei vektoriellen Messungen. Aus der elektrischen Länge kann bei Bedarf über den Verkürzungsfaktor die mechanische Länge bestimmt werden.

Durch Materialstreuungen und Inhomogenitäten birgt der Wert des Verkürzungsfaktors aus einem Datenblatt teilweise erhebliche Toleranzen. Damit erhebt die mechanische Länge nicht unbedingt den gleichen Anspruch auf Genauigkeit wie

die zuvor ermittelte elektrische Länge.

Eine Leitungsstrecke ist u.U. zusammengesetzt aus mehreren Komponenten, deren Materialien unterschiedliche Dielektrizitätskonstanten aufweisen, womit die Festlegung auf einen einzelnen Verkürzungsfaktor sowieso fehlschlägt. Wenn nicht z.B. die räumliche Suche einer Fehlerstelle die mechanische Länge erforderlich werden lässt, so ist die Laufzeit bzw. elektrische Länge von coaxialen Bauelementen eine zuverlässige Größe.

Einfluss einer Fehlanpassung

Eine immer wieder gestellte Frage: Wie beeinflusst eine Fehlanpassung die Laufzeit- bzw. Phasenmessung? Der Analyzer verfügt in der Regel über 50-Ohm-Ports, vor der Messung wurde eine Kalibrierung (TOSM) durchgeführt, der gesamte Messaufbau damit auf 50-Ohm-Komponenten optimiert. Ein Versuch soll Klarheit zu dieser Frage schaffen. Dafür

wurden zwei mechanisch gleich lange Messkabel gefertigt: das erste Kabel besteht aus RG58 (50 Ohm), das zweite aus RG59 (75 Ohm). An beiden Kabelstücken wurde eine Phasenmessung vorgenommen, das Ergebnis zeigt Bild 7: blaue Kurve 50 Ohm, orangene Kurve 75 Ohm.

Wir stellen fest: Eine Fehlanpassung beeinflusst die Laufzeitmessung nicht, beide Kabel haben (fast – die geringe Differenz ist fertigungsbedingt) die gleichen Phasen- und Laufzeitwerte.

Die orangene Kurve wurde aus Gründen der besseren Sichtbarkeit mit der Skalierung um eine Teileinheit nach oben geschoben. Dass tatsächlich eine Fehlanpassung auftritt, zeigt das eingefügte Smithdiagramm, die Ortslinie (orange - 75 Ohm) zeigt den typischen Verlauf einer Leitungstransformation bei Fehlanpassung, während die blaue Ortslinie zu einem Punkt bei 50 Ohm zusammenfällt.

Phasenleitungen, Anpassstöpfe, coaxiale Bauteile die von 50

Ohm abweichende Impedanzen aufweisen, lassen sich ohne weiteres mit dem 50-Ohm-Analyzer auf ihre elektrische Länge vermessen und optimieren.

Transfermessung versus Reflexionsmessung

Die Phasenmessung wurde als Transfermessung (S-Parameter S21) ausgeführt, es müssen also beide Enden des Messobjekts zugänglich sein. Der vektorielle Netzwerkanalyzer kann Phasenmessungen auch im „Eintorbetrieb“, also Reflexionsmessung - S11, durchführen. Stellt sich die Frage:

Kann die Laufzeit- bzw. elektrische Längenmessung auch mit der Reflexionsmessung durchgeführt werden? Das kann bedingt erfolgen, ist jedoch nicht unbedingt empfehlenswert. Die Phasenmessung von S11 basiert auf einer Reflexion, dies setzt voraus, dass eine ausreichend schlechte Anpassung vorliegt, denn sonst entsteht ja keine Reflexion. Keine Frage, dass ein offenes Kabelende diese Bedingung voll erfüllt.

Enthält das Messobjekt zu verschiedenen Frequenzen resonante Stellen (z.B. bei Antennen, Stubs) entsteht dort eine starke Absenkung der reflektierten Welle, welche die Pegelmessgrenze des Analyzers unterschreiten kann. Wenn an diesen Stellen keine Magnitude ermittelt wird, können auch keine Werte des Phasenwinkels zugeordnet werden, die aufgezeichneten Werte über dem Sweepbereich werden Lücken aufweisen.

Bauteile, wie z.B. das Präzisionsdämpfungsglied, könnten so nicht vermessen werden, denn seine Widerstandbeschaltung weist 50 Ohm, also Anpassung auf, die Reflexion S11 wird sehr gering ausfallen, und damit unter die Pegel-Messgrenze fallen. Werden die beschriebenen Randbedingungen beachtet ermöglicht der vektorielle Netzwerkanalyzer Längenmessungen in ausgezeichneter Genauigkeit. ◀

Joachim Müller